

VŠB - Technická univerzita Ostrava

Fakulta strojní
Katedra energetiky

Návrh kompenzátoru objemu
pro jadernou elektrárnu 1500 MWe

Proposal of Pressurizer for Nuclear Power Plant 1500 MWe

Student:

Bc. Jiří Janošík

Vedoucí diplomové práce:

prof.Ing.Pavel Kolat, DrSc.

Ostrava 2012

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Fakulta strojní
Katedra energetiky

Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Jiří Janošik**
Studijní program: N2301 Strojní inženýrství
Studijní obor: 2302T006 Energetické stroje a zařízení
Téma: **Návrh kompenzátoru objemu pro jadernou elektrárnu 1500 MWe**
Proposal of Pressurizer for Nuclear Power Plant 1500 MWe

Zásady pro vypracování:

Navrhnete konstrukční řešení kompenzátoru objemu jaderné elektrárny VVER 1500 generace III+. V návrhu proveďte výpočet základních rozměrů, tepelný a hydraulický výpočet s návrhem sprchového systému a elektroohříváčů.

Sestavte matematický model kompenzátoru objemu a řešte vybrané provozní a havarijní stavy.

Zadané parametry:

Tepelný výkon jaderné elektrárny 4350 MWt;
parní výkon 8840 t/hod;
tlak syté páry 7,8 MPa;
teplota chladiva v I. okruhu 298,5 / 330,7 °C;
tlak v I. okruhu 16,2 MPa.

Seznam doporučené odborné literatury:

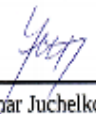
HEJZLAR, Radko. *Stroje a zařízení jaderných elektráren*. Díl 1 a 2. Vydavatelství ČVUT v Praze, 2005. 385 s. ISBN 80-01-03189-6.
MÁTAL, Oldřich. *Jaderné reaktory a jejich chlazení*. Nakladatelství CERN VUT v Brně. 2001. 116 s. ISBN 80-214-2028-6.
HEZOUČKÝ, František. *Základy teorie provozních režimů jaderných elektráren s tlakovodními reaktory*. Vydavatelství ČVUT v Praze, 2005. 185 s. ISBN 80-01-03324-4.

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.


Vedoucí diplomové práce: **prof. Ing. Pavel Kolat, DrSc.**

Datum zadání: 16.12.2011

Datum odevzdání: 21.05.2012


prof. Ing. Dagmar Juchelková, Ph.D.
vedoucí katedry




prof. Ing. Radim Farana, CSc.
děkan fakulty

Prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou diplomovou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě

.....

Jiří Janošík

Prohlašuji, že

- byl jsem seznámen s tím, že na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. – autorský zákon, zejména §35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a §60 – školní dílo.
- beru na vědomí, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen VŠB-TUO) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě diplomovou práci užít (§35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že jeden výtisk diplomové práce bude uložen v Ústřední knihovně VŠB-TUO k prezenčnímu nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího diplomové práce. Souhlasím s tím, že údaje o diplomové práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu §12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít své dílo – diplomovou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- beru na vědomí, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě :

ANOTACE DIPLOMOVÉ PRÁCE

JANOŠÍK, J. Návrh kompenzátoru objemu pro jadernou elektrárnu 1500 MWe. Ostrava: katedra Energetiky, Fakulta strojní VŠB-Technická universita Ostrava, 2012, 80.str, Diplomová práce, vedoucí prof.Ing.Pavel Kolat, DrSc.

Diplomová práce se zabývá kompenzátozem objemu, který je v jaderné elektrárně umístěný výše než primární okruh a má za úkol vyrovnávat tlakové a objemové změny, které vznikají vlivem tepelných dilatací chladiva. V úvodních částech je popsáno rozdělení reaktorů, se kterými může kompenzátor objemu pracovat. V dalších částech je proveden návrh kompenzátoru: technologický a konstrukční. Samotný závěr tvoří návrh sprchového systému, systému elektroohříváčů, které slouží ke zvýšení či snížení tlaku v kompenzátoru.

ANOTATION OF THESIS

JANOŠÍK J. Proposal of Pressurizer for Nuclear Power Plant 1500. Ostrava: Department of Power Engineering, Faculty of mechanical engineering VŠB-Technical univerzity of Ostrava, 2012, 80 pages, Thesis, head: prof.Ing.Pavel Kolat, DrSc.

This thesis deals with the pressurizer, which is in the nuclear power plant located above the primary circuit and is designed to equalize the pressure and volume changes that arise due to thermal expansion of refrigerant. The introductory sections describe types of reactors, with which the volume compensator to work. In other parts of the design of a compensator: technology and design. The ending consists of sprinkler systém design, system electroheating that serve to increase or decrease in pressure compensator.

Seznam použitých veličin

<u>Zkratka</u>	<u>Název</u>	<u>Jednotka</u>
λ	součinitel přestupu tepelné vodivosti	$\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \text{K}^{-1}$
v_l	měrný objem na počátku kroku	$\text{m}^3 \text{kg}^{-1}$
v''	měrný objem na konci kroku	$\text{m}^3 \text{kg}^{-1}$
T_l	teplota vodní hladiny	$^{\circ}\text{C}$
T''	teplota páry	$^{\circ}\text{C}$
R_p	mez kluzu	MPa
R_m	mez pevnosti	MPa
n_p	koeficient mezi v kluzu	-
n_m	koeficient mezi pevnosti	-
n	počet elektroohříváčů	-
m_2	změna množství vody	$\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$
m_1	změna množství páry	$\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$
L	délka topného odporu	mm
i'	entalpie syté vody	$\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$
i''	entalpie syté páry	$\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$
h	stoupání spirály	mm
d_s	střední průměr spirály	mm
d	průměr	mm
C	měrné teplo FE	$\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \text{K}^{-1}$
p	provozní tlak	MPa
Δp_{\max}	maximální tlakový rozdíl	MPa
ΔV_{\max}	maximální změna objemu	MPa
Q_{vp}	Změna objemu vytlačeného I chladiva	$\text{m}^3 \text{s}^{-1}$
\dot{m}_s	hmotnost vody ze sprchového systému	$\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$

\dot{m}_p	hmotový tok vody z I okruhu	kg.s^{-1}
V_p	výpočet potřebného plynu	m^3
\dot{m}_{ch}	hmotnost zkondenzované vody na sprchových kapkách	kg.s^{-1}
\dot{m}_e	pára vzniklá činnosti elektroohříváčů	kg.s^{-1}
P_I	tepelný výkon z páry do stěny	W
\dot{m}_K	hmotový tok zkondenzované vody	kg.s^{-1}
\dot{m}_h	kondenzace na hladině	kg.s^{-1}
P_{II}	tepelný výkon z páry na hladinu	W
\dot{m}	celková změna množství hmoty	kg.s^{-1}
P_{III}	odvedený tepelný výkon z vody do stěn	W
α	součinitel přestupu tepla	$\text{kW.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$
S_I	plocha stěn KO nad hladinou a je funkcí výšky hladiny	m^2
S_{II}	plocha hladiny	m^2
S_{III}	plocha stěn KO pod hladinou	m^2
P_{IV}	tepelný výkon dodávající z páry do stěny	W
\dot{T}_s	střední teplota stěny	$^{\circ}\text{C}$
C_s	měrná tepelná kapacita	$\text{J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$
\dot{p}	časová změna tlaku	MPa.s^{-1}
P_e	výkon elektroohříváčů	W
Q_j	výkon jednoho elektroohříváče	W
ld	navrhovaná délka topného odporu	cm
Q	zdrojové teplo	W.cm^{-3}
P_1	tepelný výkon na povrchu vodiče	W.cm^{-2}
dU	úbytek napětí	V
Ro	měrný odpor	$\Omega.\text{mm}^2.\text{m}^{-1}$
dU_1	velikost napětí	V
h	stoupání spirály	mm

I	proud	A
R	odpor	Ω
$ld1$	vypočtená délka topného odporu	cm
$tstř$	střední pracovní teplota	$^{\circ}\text{C}$
σDp	dovolené napětí mezi kluzu	MPa
σDm	dovolené napětí mezi pevnosti	MPa
σD	dovolená napětí	MPa
sr	výpočtová tloušťka stěny dna	mm
K	součinitel	-
DR	výpočtový průměr	mm
sN	nominální tloušťka stěny dna:	mm
sR	výpočtová tloušťka stěny válcového pláště	mm
lc	vzdál. mezi vnějšími nátrubky	mm
dc	max. průměr vnějšího nátrubku	mm
$R1$	poloměr 1. roztečné kružnice	mm
$R2$	poloměr 2. roztečné kružnice	mm

Obsah diplomové práce :

1. Úvod.....	10
1.1 Reaktory a jejich generace.....	11
1.1.1 I Generace.....	11
1.1.2 II Generace.....	12
1.1.3 III Generace.....	13
1.1.4 +III Generace.....	14
2. Systém kompenzace objemu.....	14
2.1 Popis součástí jaderné elektrárny VVER.....	16
3. Kompenzátory objemu.....	17
3.1 Kompenzátor objemu s plynovým polštářem.....	17
3.1.1 Popis.....	17
3.1.2 Schéma zapojení.....	18
3.1.3 Informativní výpočet potřebného plynu.....	19
3.2 Kompenzátor objemu s parním polštářem.....	20
3.2.1 Popis zapojení.....	20
3.2.2 Schéma zapojení	21
4. Konstrukční a technologický návrh.....	22
4.1 Základní údaje pro výpočet.....	22
4.2 Rozbor namáhání	23
4.3 Zvolený materiál.....	24
4.4 Návrh základních rozměrů KO.....	26
4.5 Výpočet stěny pláště.....	28
4.5.1 Stěna centrálního pláště 2.....	28
4.5.2 Stěna centrálního pláště a vrchního pláště 1.....	29
4.5.3 Výpočet stěny vrchního dna.....	30

4.5.4 Výpočet víka průlezu.....	34
4.6 Výkres části kompenzátoru	34
5. Matematický model KO VVER 1500.....	41
5.1 Popis modelu kompenzátoru objemu	42
5.2 Matematický model.....	43
5.2.1 Popis nerovnovážného stavu.....	44
5.2.2 Popis rovnovážného stavu.....	48
5.3 Výpis z programu Matlab.....	50
5.4 Vstupní údaje KO VVER 1500.....	62
6. Návrh sprchového systému.....	63
7. Návrh TEO.....	66
7.1 Maximální výkon elektroohříváčů.....	66
7.2 Návrh svislých trubkových elektroohříváčů umístěných ve spodním dně....	67
7.2.1 Výpočet elektroohříváčů	68
7.2.2. Kontrola pracovní teploty elektroohříváčů a tepelných toků	69
7.2.3 Návrh ocelového pláště TEO.....	71
7.2.4 Volba počtu TEO.....	72
8. Závěr.....	79
8.1 Seznam obrázků a tabulek.....	80
8.2 Použité zdroje literatury.....	80

1. Úvod

V moderní době je trendem stále stoupající spotřeba elektrické energie. Díky tomu se musí nutně zefektivňovat její výroba. Okamžik, kdy dojde k vyčerpání dostupných zdrojů fosilních paliv se nezadržitelně blíží. Díky zvýšení cen energií kvůli rozmachu alternativních obnovitelných zdrojů je v současnosti nejúčinnější řešením použití jaderných elektráren.

Česká republika se rozhodla postavit další jaderné reaktory. Podívejme se, jaké možnosti výběru v současnosti měla a bude mít v nejbližší budoucnosti. Tato skutečnost byla hlavním aspektem pro výběr mé diplomové práce a to návrh objemového kompenzátoru pro jadernou elektrárnu VVER 1500.

V úvodu jsem svou diplomovou práci zaměřil na popsání všech generací reaktorů, druhů reaktorů a popisu kompenzace objemu, dále se již zabývám samotným kompenzátozem objemu.

V rámci státního úkolu "Parogenerátor a kompenzátor objemu" byl odvozen matematický model stavu parního kompenzátoru objemu pro řešení havarijních a provozních situací. Je zde popsáno matematické modelování přechodových procesů v systému kompenzace chladiva. Matematický model je řešen v programu Matlab a je určený pro analýzu časové závislosti tlaku, výšky hladiny a dalších parametrů.

Hlavní část této práce obsahuje : matematický model, konstrukční a technologický návrh, ve kterém jsou uvedeny slitiny ocelí pro výrobu a navrženy nátrubky: vstříku, odvodu páry, průlezu, dále pak víko průlezu, víko elektroohřívачů.

Závěrečnou část tvoří provozní charakteristiky s návrhem svislých elektroohřívачů, které jsou umístěny ve spodním dně a mají za úkol kompenzovat tlak, jestliže dojde k poklesu pod stanovenou hladinu.

1.1 Reaktory a jejich generace

1.1.1 I Generace

Reaktory I generace se stavěly hlavně v padesátých a šedesátých letech. Velice často se jednalo o kusové prototypově stavěné reaktory. V podstatě se ověřovalo, zda je možné používat jaderné reaktory k výrobě elektrické energie. Dnes už žádný z nich nefunguje. Reaktory Magnox se stavěly ve Velké Británii. Bylo postaveno 11 elektráren s 26 reaktory tohoto typu. Jednalo se o reaktory s grafitovým moderátorem, chlazené oxidem uhličitým a používající jako palivo přírodní uran bez obohacení. Byly využívány i pro produkci plutonia. Reaktor byl předchůdcem nové generace plynem chlazených reaktorů.

tab. 1.1. Vývoj reaktoru

I	II	III	III+		
VVER-440	VVER-440	VVER-1000	VVER-1000		
V-179	VVER-1000	V-428	VVER-1200		
V-230	VVER-187	V-412	VVER-1500		
V-270	VVER-213	V-446	V-491		
	VVER-302		V-501		
	VVER-320				
	VVER-338				
1960	1970	1980	1990	2000	2010
Obnisk 1	LWR, PWR	System 80+	ESWBR		
Shippigport	BWR	ABWR	APWR		
Dresden	CANDU	EPR			
Fermil	RBMK	AP 1000			
Magnox	AGR	SFR			

1.1.2. II Generace

Většina reaktorů dodávajících elektrickou energii v současnosti jsou reaktory generace II. Navazovaly na zkušenosti s úspěšnými modely generace I. Elektrárny se už stavěly v sériích, i když každá byla jednotlivě projektována a konstruována. Využívaly však stejné principy a projekty na sebe navazovaly. Zdaleka největší počet z nich jsou lehkovodní tlakové reaktory, které tvoří více než polovinu pracujících reaktorů. Paří mezi ně i reaktory VVER-440 a VVER-1000, které jsou využívány v jaderných elektrárnách Dukovany a Temelín. Jen reaktorů VVER bylo ve světě postaveno více než sedmdesát. Druhými nejčastěji využívanými reaktory jsou lehkovodní varné reaktory. Kanada svoji jadernou energetiku postavila na těžkovodních reaktorech typu CANDU. Velká Británie vyvinula na základě zkušeností s reaktory Magnox grafitové reaktory AGR chlazené opět oxidem uhličitým. V Rusku se kromě lehkovodních reaktorů typu VVER stavěly i grafitové reaktory s vodním chlazením typu RBMK.

tab. 1.2. Rozdělení reaktoru podle chlazení

Typ reaktoru	Moderátor	Chlazení	Označení
Tepelný	Lehká voda	H ₂ O	Tlakovodní (PWR)
			Varné (BWR)
	Těžká voda	D ₂ O	Těžkovodní CANDU (PHWR)
		H ₂ O	Těžkovodní, chlazený obyčejnou vodou (HWLWR)
		CO ₂	Těžkovodní, chlazený plynem (HWGCR)
	Grafit	He	Vysokoteplotní (HTGR)
		CO ₂	Plynem chlazené (GCR) a zdokonalené (AGR)
		H ₂ O	Vodou chlazený (LWGR)
Rychlý	Bez moderátoru	Na	Rychlý množinový (FBR)

1.1.3 III Generace

Reaktory fungují spolehlivě a jsou ekonomicky výhodným zdrojem elektrické energie. Je kladen důraz na pasivní bezpečnostní prvky. Řešení nestandardních či krizových situací probíhá automaticky na základě přírodních zákonitostí a nepotřebuje elektrický či mechanický zásah operátora nebo kontrolního systému. Je založeno na gravitaci, přirozeném proudění, odolnosti proti tlaku či teplotám. Reaktory mají jednodušší a robustnější konstrukci, to umožňuje zjednodušení provozu a větší odolnost proti lidským chybám. Velmi silně se redukovala možnost nehod s roztavením jádra. Zmenšení spotřeby uranu i objemu radioaktivního odpadu umožňuje vysoké vyhoření paliva.

tab.1.3. Typy reaktorů

TYPY REAKTORŮ		
ABWR AGR APS-1	BWR CANDU	CANDU-B
EPR	FBR FBR (Phénix)	FBR-80
FBR (Super-Phénix)	FBR-600	HTGR
GCHWR	GCR	OPR
HWLR	KS-150 (A1)	(CANDU -6)
PHWR	PHWR 700	RBMK 1000
PWR	RBMK	VVER 440 (V 213)
RBMK 1500	SGHWR	VVER 440 (V 230)
VVER 1000	VVER 1200	VVER 1500

1.1.4 +III Generace

Jako generace III+ se označují reaktory, které mají vylepšené prvky pasivní bezpečnosti tak, že se v případě nestandardní situace reaktor dostane do bezpečného stavu automaticky bez pomoci aktivních částí. Zároveň dochází k dalším vylepšením jejich vlastností. V různém stupni rozpracovanosti je několik projektů tohoto typu reaktorů. Pokročilý lehkovodní varný reaktor typu ABWR, který začal pracovat v elektrárně Japonsku, je na rozhraní mezi generací III a III+. Má výkon 1356 MWe. Ve Finsku a Francii se jedná o reaktor typu EPR s výkonem mezi 1600 až 1750 MWe. V Rusku se vyvíjí nový typ lehkovodního tlakového reaktoru na základě posledních osvědčených modelů VVER-1000, vylepšených hlavně z bezpečnostního hlediska. Tento model VVER-1000 se staví v současnosti v Číně a Indii.

Typ VVER-1200 by měl splňovat parametry reaktoru třetí generace s velmi dobrými pasivními bezpečnostními prvky. Reaktor by měl mít zvýšenou odolnost proti zemětřesení a pádu letadla. Typ VVER-1500 by se měl uplatnit v elektrárně Novovoronež II. s plánovaným spuštěním v letech 2012-13.

2. Systém kompenzace objemu

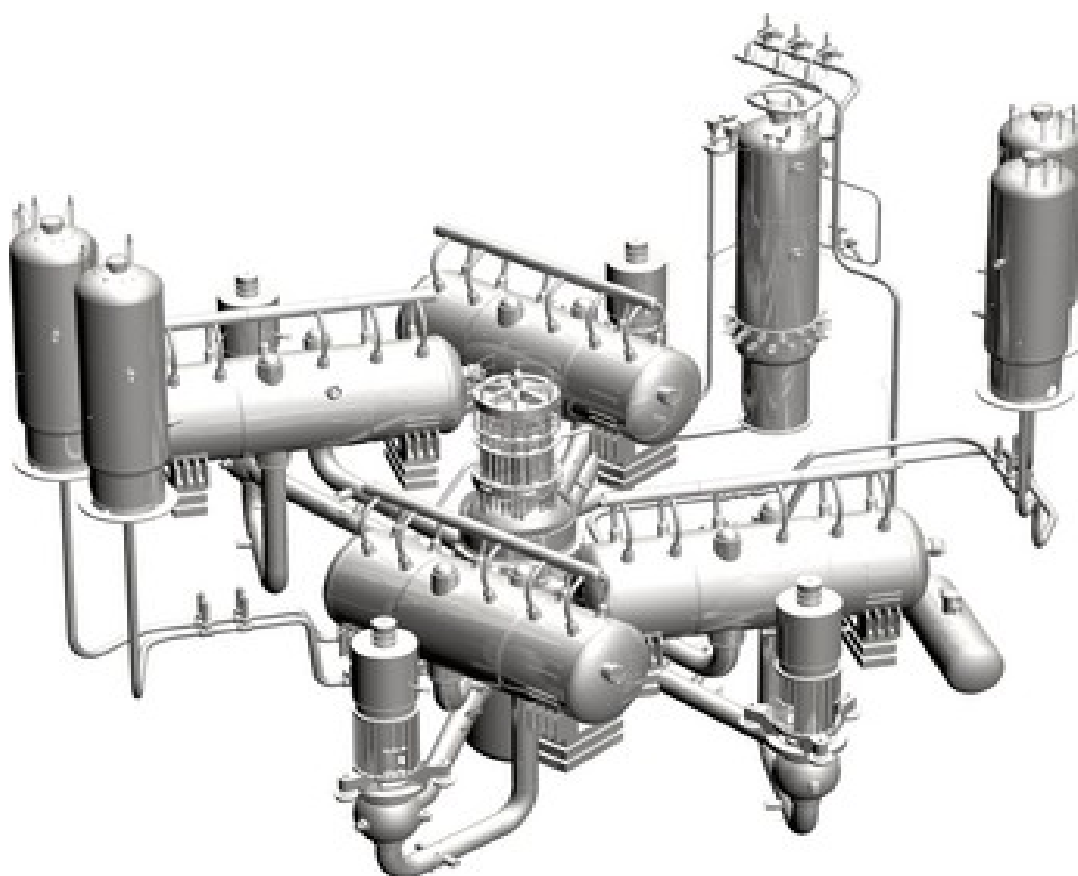
Systém kompenzace objemu chladiva jaderného reaktoru je nezávislým systémem reaktoru, připojený k primárnímu okruhu. Systém vyrovnává objemové a tlakové změny v primárním okruhu, které vznikají vlivem tepelných dilatací chladiva.

Hlavní částí systému je kompenzátor objemu. Plní funkci regulátoru tlaku a objemu kapalného chladiva v primárním okruhu. Ze dvou třetin je zaplněn chladivem primárního okruhu a z jedné třetiny parou. Tlak v primárním okruhu je určován tlakem páry v horní části kompenzátoru objemu. Při poklesu tlaku v primárním okruhu se zapínají elektroohříváky ve spodní části kompenzátoru objemu. Tím se zvětší objem páry v horní části kompenzátoru objemu a v důsledku toho i tlak v primárním okruhu. Při vzrůstu tlaku v primárním okruhu nad stanovenou hladinu je do činnosti uveden sprchový systém v horní části kompenzátoru. Jeho provozem se zmenší objem páry v parní části kompenzátoru a následně se sníží tlak v primárním okruhu. Pokud by systém nezajistil potřebné snížení tlaku v primárním okruhu, došlo by k otevření odlehčovacího ventilu a popřípadě i pojistných ventilů. Přes tyto ventily se pára přepouští do barbotážní nádrže, kde kondenzuje a při delším otevření pojistných ventilů přechází do záchytných bazénů v hermeticky uzavřených prostorách. Výrobce kompenzátoru objemu v České republice je firma VÍTKOVICE a.s.

Systém kompenzace obsahuje:

- kompenzátor objemu
- pojistné ventily
- barbotážní nádrž
- spojovací potrubí a armatury
- omezovací zařízení havarijních účinků

obr. 2.1 Schéma jaderné elektrárny VVER



2.1 Popis součástí jaderné elektrárny VVER

Jaderný reaktor - v jaderném reaktoru dochází k štěpení jader uranu a v palivu se uvolňuje energie, která se mění na teplo ohřívající vodu v primárním okruhu.

Regulační kazety umožňují regulaci neutronového toku. V případě nestandardních situací slouží k okamžitému zastavení štěpné reakce. Složí na změny výkonu reaktoru.

Kompenzátor objemu - je tlaková nádoba systému kompenzace objemu, kterým se zabezpečuje následné udržení provozního tlaku v primárním okruhu.

Sprchy kompenzátoru objemu slouží ke snížení tlaku v primárním okruhu. Do kompenzátoru se vstřikuje voda ze studené větve cirkulačního okruhu.

Elektroohříváče slouží ke zvýšení tlaku v primárním okruhu. Jejich zapnutím se přehřívá vodní náplň kompenzátoru objemu, čímž roste tlak v primárním okruhu.

Barbotážní nádrž - je válcová nádoba sloužící na příjem a kondenzaci parovzdušné směsi z kompenzátoru objemu.

Parogenerátor - je tepelný výměník, který využívá energii uvolněnou v reaktoru na výrobu nasycené páry. Pára dále pohání turbínu.

Turbína - v turbíně se přeměňuje na lopatkách rotoru tepelná a kinetická energie páry na energii mechanickou.

Separátor - a přehříváč je válcová nádoba, kde se pára přicházející z vysokotlakého dílu turbíny zbavuje vlhkosti a přehřívá nad teplotu sytosti, čímž se zvyšuje účinnost pracovního cyklu.

Elektrický generátor - je pevně spojený s rotorem turbíny a slouží na přeměnu mechanické energie na energii elektrickou.

Kondenzátor - slouží na zkapalnění par z turbíny. Pára kondenzuje na vnějším povrchu trubek, ve kterých protéká voda z chladících věží.

Vysokotlaká regenerace - napájení vody se skládá ze dvou vertikálních nádob, které slouží k ohřevu vody, čímž se zvýší tepelná účinnost pracovního cyklu.

Nízkotlaká regenerace - kondenzátu se skládá z pěti vertikálních nádob, které slouží k postupnému ohřevu kondenzátu, čímž se zvyšuje účinnost pracovního cyklu.

Chladicí věže - v nich se voda ochlazuje, z kondenzátorů přebytečné nevyužitelné teplo je odváděno do atmosféry. Kondenzát vznikající z páry je vedený do napájecí nádrže a odtud napájecími čerpadly zpět do parogenerátoru, kde se znovu změní na páru a proudí do turbíny.

3. Kompenzátory objemu

3.1. Kompenzátor objemu s plynovým polštářem

3.1.1 Popis

Plynovým polštářem pro kompenzátor objemu je nejčastěji dusík, který je nad hladinou vody a v primárním okruhu umožňuje svou stlačitelností vyrovnávání tepelných dilatací vody.

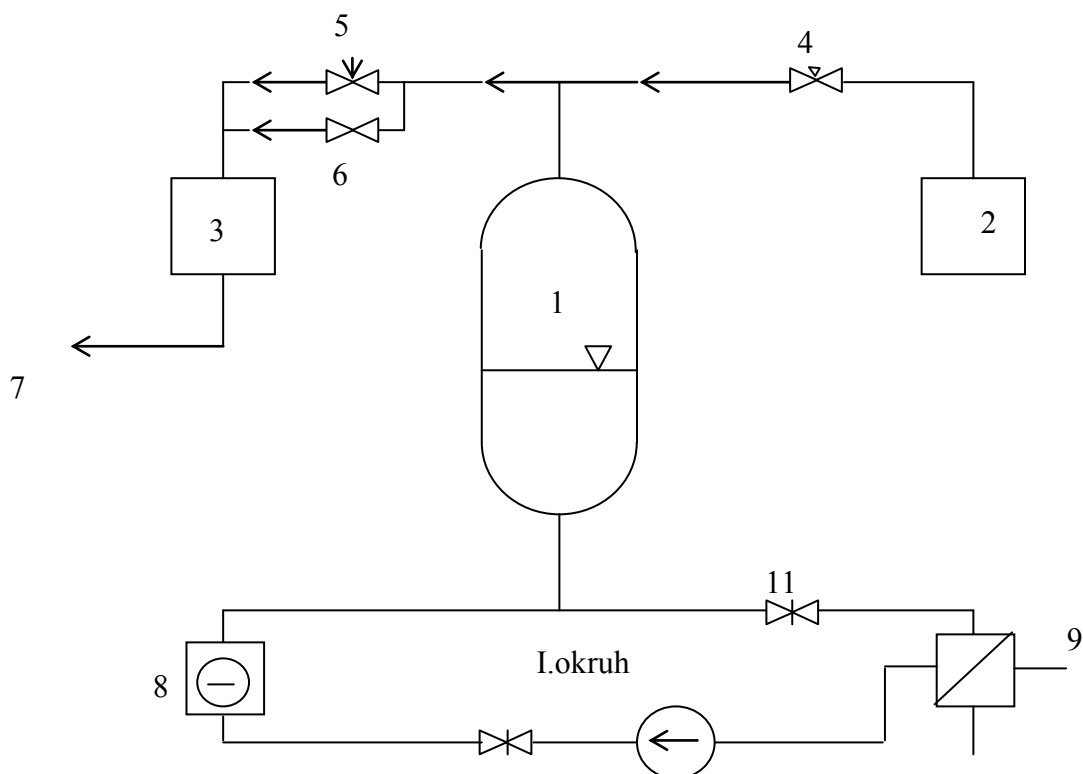
S plynovým polštářem byly postaveny například čtyři kompenzátory objemu u 1. bloku novovoroněžské jaderné elektrárny, který je však již vyřazen z provozu. Dusík, který je ze vhodných plynů nejvhodnější se však u kompenzátoru objemu s parním polštářem stále používá při najíždění reaktoru ze studeného stavu, při jeho odstavování a během provozu k ředění třaskavé směsi v barbotážní nádrži. U všech později postavených reaktorů typu VVER se používají kompenzátory objemu s parním polštářem.

Při provozu reaktoru, změnách jeho výkonu, najíždění a odstavování, dochází k přechodové nebo trvalé změně teploty chladiva, ke změně jeho objemu, a tím ke změně tlaku chladiva v uzavřeném primárním okruhu. Aby bylo možno regulovat tyto změny tlaku, umísťuje se nad primární okruh tlaková nádoba s plynovým nebo parním polštářem zvaná kompenzátor objemu. Je spojena potrubím s primárním okruhem a při zvýšení teploty a zvětšení objemu může část chladiva přetéci do kompenzátoru objemu, přičemž dochází ke stlačení plynového nebo parního polštáře. Při snížení teploty v primárním okruhu odtéká voda z kompenzátoru do primárního okruhu.

Kompenzátory objemu jsou nutné pouze u tlakovodních reaktorů. Parní objem reaktoru nebo bubnu zastává jeho funkci u varných reaktorů a slouží jako separátor vlhkosti a páry. Kompenzátor objemu u tlakovodního reaktoru musí být připojen k neodpojitelné části jedné smyčky primárního okruhu. Tedy mezi reaktor a hlavní uzavírací armaturu, aby při uzavření hlavních uzavíracích armatur na příslušné smyčce nemohlo dojít k oddělení KO od reaktoru.

Kompenzátor objemu s plynovým polštářem používá obvykle jako polštáře dusíku. Z inertních plynů by byl vhodným též argon, ale je drahý. Určité problémy při použití dusíku jsou v souvislosti s jeho pronikáním do primární vody s možností vzniku kyseliny dusičné, která způsobovala korozi. To se řešilo korigováním vodního režimu primárního okruhu přidáváním čpavku a použití katexu v NH_4 -formě při úpravě vody primárního okruhu.

3.1.2. Schéma zapojení kompenzátoru objemu s plynovým polštářem



- 1- kompenzátor objemu
- 2- zásobní nádrž dusíku
- 3- nádrž na odvedené plyny z KO
- 4- regulační ventil pro připouštění dusíku do KO
- 5- pojistné ventily
- 6- přepouštěcí ventily
- 7- odvod přes filtry do komína
- 8- reaktor
- 9- parní generátor
- 10- hlavní cirkulační čerpadlo
- 11- hlavní uzavírací armatury

Při zvyšování teploty chladiva a zvyšování výkonu reaktoru stoupá hladina a tlak v kompenzátoru objemu. K udržení tlaku se odvádějí plyny z KO přes přepouštěcí ventily, při velkém vzrůstu tlaku případně i přes pojistné ventily do nádrže na odvedené plyny, odkud se po určité době mohou vypouštět po snížení aktivity do komína. Při snižování teploty a objemu chladiva v I. okruhu dojde ke snížení hladiny tlaku v KO. Vyrovnávání se děje připouštěním dusíku do KO přes regulační ventily ze zásobníků dusíku, které mohou být doplňovány například kompresorem.

3.1.3. Předběžný informativní výpočet potřebného plynu

Kompenzátor objemu s plynovým polštářem :

-může se provést pomocí rovnice adiabaty:

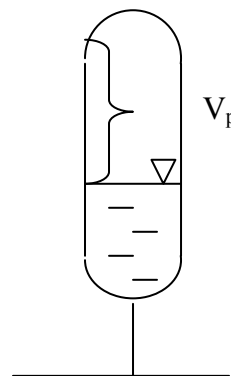
$$p \cdot V_p^\chi = (p + \Delta p_{\max})(V_p - \Delta V_{\max})^\chi$$

$$V_p = \frac{\Delta V_{\max}}{1 - \left(\frac{p}{p + \Delta p_{\max}}\right)^{\frac{1}{\chi}}}$$

p - provozní tlak KO

Δp_{\max} - maximální tlakový rozdíl

ΔV_{\max} - maximální změna objemu chladiva



Nevýhody

1) Dusík se rozpouští ve vodě, vznikají kyseliny dusičná a dusitá, které znesnadňují udržování předepsaného vodního režimu v primárním okruhu.

2) Dusíkové kompenzátory objemu mají větší objem než kompenzátory s parním polštářem.

3) Při průtoku dusíku pojistnými ventily kritickou rychlostí dochází k namrzání vody na sedle ventilu, takže se může stát, že po poklesu tlaku ventil dobře dosedne a tedy nezavře.

3.2. Kompenzátor objemu s parním polštářem

Těmito kompenzátory jsou vybaveny všechny u nás postavené elektrárny s tlakovodními reaktory.

Systém kompenzace objemu tlaku chladiva s kompenzátorem objemu s parním polštářem se skládá z těchto hlavních součástí :

- 1) z kompenzátoru objemu
- 2) z barbotážní nádrže
- 3) z pojistných, regulačních a jiných ventilů a příslušenství

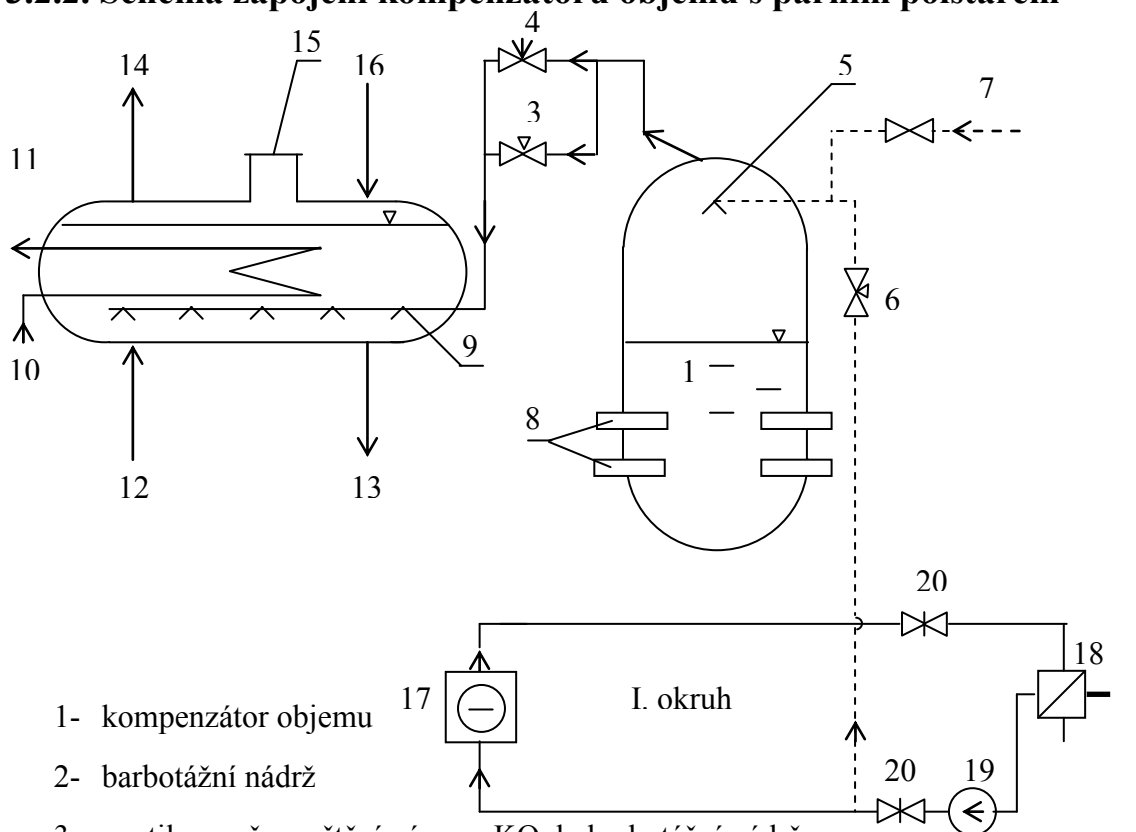
3.2.1. Popis zapojení

Kompenzátor objemu má svůj vodní prostor a je spojen potrubím s jednou ze smyček primárního okruhu. Kompenzátor objemu se nachází výše než primární okruh, shromažďují se v něm plyny uložené v primárním okruhu. Vyrovnávání tlaku v kompenzátoru objemu je prováděno pomocí parního polštáře nad vodní hladinou.

Dojde-li k poklesu tlaku v kompenzátoru objemu, zapnou se automaticky elektrické ohříváky vody, nastává var, vývin páry a tlak stoupá. Po dosažení předepsaného tlaku se ohříváky samočinně vypnou. Naopak jeli zapotřebí tlak snížit, otevře se regulační ventil a voda ze studené větve jedné ze smyček primárního okruhu se rozprašuje tryskami do parního prostoru kompenzátoru objemu. Tím dochází k ochlazení, kondenzaci páry a ke snížení tlaku. V případě velkého zvýšení se samočinně otevrou pojistné ventily a přepustí páru do barbotážní nádrže. Voda v barbotážní nádrži je ochlazována trubkovými hady, jimiž proudí voda. Jelikož se do kompenzátoru objemu s párou přivádějí do barbotážní nádrže i jiné nekondenzující plyny, hlavně vodík, vytvářejí třeskavý plyn a koncentrace vodíku je snižována pod 2,5% přívodem dusíku. Vodík s nekondenzujícími plyny je odváděn potrubím na spalovací zařízení.

Pro případ selhání je barbotážní nádrž opatřena pojistnou havarijní membránou, která se při překročení maximálního tlaku protrhne a zabrání prasknutí barbotážní nádrže.

3.2.2. Schéma zapojení kompenzátoru objemu s parním polštářem



4. Konstrukční a technologický návrh

KO je základním článkem systému kompenzace teplotních a tlakových změn teplonosného média primárního okruhu jaderné elektrárny. Je určen k vytváření tlaku při najíždění bloku, k udržování stálého tlaku při stacionárních režimech.

KO je vertikálně situovaná tlaková nádoba s válcovým pláštěm a eliptickými dny. Ve spodní polovině je zaplaven vodou část vyplňuje sytá pára.

Na dolním dně je umístěn nátrubek JS 350, který pomocí spojovacího potrubí spojuje KO s horkou větví primárního okruhu, tj. s větví hlavního cirkulačního potrubí a nátrubky svislých elektroohříváčů.

Na horním dně KO je nátrubek odvodu páry a průlez do KO. Nátrubkem vstřiku se vstřikuje do KO pomocí sprchového zařízení vody ze studené větve. Nátrubkem odvodu páry odvodu páry se odvádí pára z KO přes pojistné ventily do systému barbotážní nádrže. Průlez slouží ke kontrole vnitřního prostoru KO a vestavby.

Na tělese KO jsou umístěny ještě další nátrubky malých průměrů, které slouží jako stavoznak, teploměry, tlakoměry.

Válcová část a dna KO jsou vyrobeny z oceli 10GN2MFA. Na vnitřním povrchu je proveden návar z austenitické oceli 08CH18N10T. Spodní nátrubek, nátrubek vstřiku, nátrubek odvodu páry, nátrubek průlezu, víko průlezu a víko elektroohříváčů jsou vyrobeny z oceli 10GN2MFA a jsou a jsou opatřena na vnitřní straně návary a ochranou košílkou z mat. 08CH18N10T. Nátrubek vstřiku a spodní nátrubek JS 350 jsou proti teplotním šokům navíc opatřeny stínícím krytem z mat 08CH18N10T. Nátrubek vstřiku a spodní nátrubek JS 350 jsou proti teplotním šokům navíc opatřeny stínícím krytem z mat 08CH18N10T.

Ke spodnímu dnu je přivařena válcová podpěra z materiálu 22K. Tato je z transparentních důvodů rozdělena na dvě části, které se spojují na montáži. Spodní část podstavce je přírubou položena na betonový základ a je upevněna základovými šrouby. K zajištění proti seizmickým účinkům se KO opírá horní část válcového pláště do opěrné konstrukce, která je ukotvena v šachtě KO. Skládá se z opěrného věnce a z jednotlivých opor.

U KO výchozí konstrukce je vnitřní vestavba KO v dolní části tvořena 50-ti

elektroohříváky tvaru U. Jsou rozmístěny ve dvou řadách po 25-ti rovnoměrně po obvodu a po výšce vzájemně předsazený. Uprostřed kompenzátoru jsou elektroohříváče podepřeny kruhovou podpěrrou, která je vyrobena z materiálu 08CH18N10T a je přivařena k vnitřnímu povrchu spodního dna. Kvůli dilataci jsou v podpoře široké půlkruhové zářezy.

Vstřikovací systém umístěný v horní části se skládá z rozvodného potrubí a sprchového systému. Trubkou je systém propojen s nátrubkem vstřiku na horním dně. Umístěná kulisa kolem vstřikovacího systému brání tomu, aby se vstřikovaná „studená“ voda roztržkovala po plášti a tím způsobovala tepelné šoky. Je vyrobena z oceli 08CH18N10T. Po celé výšce kompenzátoru je středem vedeno žebříkové schodiště se čtyřmi galeriemi, kterými se kontroluje vnitřní povrch a vestavba. Kulisa je volně zavěšena na dvou řadách nosníků a může volně dilatovat. Otvory pro vložení elektroohříváčů a průlez jsou zakryty deskovými víky se šroubovými spoji.

4.1. Základní údaje pro výpočet

jmenovitý tlak	16.2 MPa
objem vody	71 m ³
objem páry	29 m ³
jmenovitá teplota	314,6 °C
výška hladiny	12,84 m
výpočtový tlak	18 MPa
výpočtová teplota	350 °C
pracovní prostředí	pára, voda primárního okruhu.

4.2. Rozbor namáhání

- ostatní zatížení :

- a) seismické zatížení
- b) zatížení od tíhy média

- c) zatížení od vlastní tíhy
- d) zatížení nátrubků od potrubí
- e) tlakové dynamické zatížení
- f) teplotní zatížení nestacionární

výpočtový přetlak	18 MPa
výpočtová teplota	350 °C
zkušební teplota	T=130 °C
zkušební přetlak	p _z = 19,6 MPa (těsnostní zkouška)
zkušební přetlak	p _z = 24,5 MPa (pevnostní zkouška)

4.3. Zvolený materiál

Pro jaderně energetická zařízení lehkovodního typu velkých výkonů je nutno zajišťovat stavbu rozměrných tlakových nádob, pracujících při teplotách do 350 °C pod tlakem 18 MPa. Tyto rozměrné tlakové nádoby musí být vyrobeny z těžkých výkovků a tlustých plechů ze svařitelné konstrukční oceli s dobrou prokalitelností, jelikož se jedná o nádoby s tloušťkou stěny přes 200mm. Tomuto požadavku nevyhovují uhlíkové nebo uhlík-manganové oceli, používají se konstrukční legované oceli.

Používá se svařitelná nikl- molybdenová konstrukční ocel 10GN2MFA s minimální mezí kluzu 343 MPa a s minimální mezí pevnosti 539 MPa při teplotě 20 °C. U této oceli byl proveden podrobný průzkum přechodové teploty křehkosti a únavových vlastností v závislosti na asymetrii zatěžovacího cyklu.

Zařízení se v současné době vyrábí z nízkolegovaných feritických ocelí a vnitřní část se pak chrání proti korozi vrstvou austenitické nerezavějící oceli. Tato výstelka se zajišťuje automatovým navařováním pásových elektrod pod tavidlem na mezivrstvu 07Ch25N13, která má lepší svařitelnost se základním materiálem 10GN2MFA než konečný austenitický návar 08Ch18N10T.

Materiál austenitický návar*tab 4.1.*

Re min = 284 [MPa]

Rmmin = 422 [MPa]

A5 min = 18 [%]

Zmin = 25 [%]

T	°C	20	350	400
Rp	MPa	284	177	177
Rm	MPa	422	324	324
A5	[%]	18	10	10
Z	[%]	25	13	13

Materiál 10GN2MFA*tab 4.2.*

Re min = 343 [MPa]

Rmmin = 540 [MPa]

A5 min = 16 [%]

Zmin = 55 [%]

T	°C	20	100	200	300	350	400
Rp	MPa	343	324	304	304	294	284
Rm	MPa	540	510	510	491	491	491
A5	[%]	16	16	15	14	14	14
Z	[%]	55	54	53	51	50	50

Přísadový prvek*tab 4.3.*

Prvek	C	Mn	Si	Ni	Cr	Mo	V	Al
[%]	0.1	0.8	0.3	1.95	0.3	0.5	0.04	0.04

Materiál 22K*tab 4.4.*

Re min = 216 [MPa]

Rmmin = 431 [MPa]

T	°C	20	350
Rp	MPa	216	186
Rm	MPa	431	353

Přísadový prvek*tab 4.5.*

Prvek	C	Mn	Si	Ni	Cr	Mo	V	Al
[%]	0,21	0,9	0,3	0,42	0,3	0,11	0,04	0,0

Austenitická ocel*tab 4.6.*

σ_F	MPa	3000	2000	1000	400	200	70	60
No	počet .cyklů	10	20	100	1000	10000	2000000	10000000

Uhlíková ocel*tab 4.7.*

σ_F	MPa	2000	1000	500	300	200	100	80
No	počet .cyklů	10	80	400	2000	10000	300000	8000000

4.4. Návrh základních rozměrů KO

Vycházím ze zadání výšky hladiny 12,84 m o objemu vody 55 m³

$$\text{Objem elipsoidu} \quad V_{\text{elip}} = \frac{4}{3 \cdot \pi \cdot a \cdot b_2} \quad [\text{m}^3] \quad (1)$$

$$\text{Doporučené poměry} \quad a = \frac{D}{2} \quad (2)$$

$$b = \frac{D}{4} \quad (3)$$

$$\text{objem válce} \quad V_{\text{válce}} = \pi \cdot D_2 \cdot L/4 \quad [\text{m}^3] \quad (4)$$

Návrh rozměrů :

$$\text{Objem vody} = V_{\text{válce}} + V_{\text{elip}}/2$$

$$V_V = \frac{\pi \cdot D_2 \cdot (L - b)}{4} + \frac{3}{4} \cdot \pi \cdot a \cdot \frac{b_2}{2} \quad (5)$$

$$D_3 - 6 \cdot L \cdot D_2 + 1320/\pi = 0 \quad (6)$$

Kvadratickou rovnici řeším hledáním předpokládaného kořene metodou půlení intervalu v rozmezí $D = 3,9 - 4,7$

Metoda půlení intervalu tab 4.8.

D(x)	f(x)	D(x)	f(x)	D(x)	f(x)
[m]		[m]		[m]	
3,9	65,02	4,12	12,22	4,15	3,01
4,0	39,24	4,13	8,36	4,151	1,64
4,1	12,60	4,14	5,65	4,152	1,62
4,2	-10,42	4,15	2,08	4,153	1,16
4,3	-42,36	4,16	-0,64	4,154	0,92
4,4	-72,12	4,17	-2,50	4,155	0,57
4,5	-102,86	4,18	-5,37	4,156	0,41
4,6	-134,16	4,19	-8,78	4,157	0,08
4,7	-164,47	4,20	-10,56	4,158	0,07

Předběžný vnitřní průměr kompenzátoru

volím 4,2 m. Výpočet parametrů eliptického dna : $a = 2,1 \text{ m}$

$$b = 1,05 \text{ m}$$

$$\text{Objem páry} = V_{\text{válce}} + V_{\text{elip}}/2$$

$$V_p = \frac{\pi \cdot D_2 \cdot (L_p - b)}{4} + \frac{3}{4} \cdot \pi \cdot a \cdot \frac{b_2}{2} \quad (7)$$

$$L_p = 4 \cdot (V_p - \frac{3}{4} \cdot \pi \cdot a \cdot \frac{b_2}{2}) / (\pi \cdot D_2) + b = 5,61 \text{ [m]} \quad (8)$$

Celková výška KO:

$$L_c = L + L_p = 18,45 \text{ [m]} \quad (9)$$

4.5. Výpočet stěny pláště

Dovolená napětí základního materiálu 10GN2MFA pro výpočet: dna, pláště, nátrubků je dáno jako menší z hodnot.

$$\sigma_{Dp} = \frac{R_p}{n_p} = 196 \text{ [MPa]} \quad (10)$$

$$\sigma_{Dm} = \frac{R_m}{n_m} = 188 \text{ [MPa]} \quad (11)$$

$$\sigma_D (\text{vyp.hod.}) = 188 \text{ [MPa]}$$

Volím: $n_p = 1,5$ – součinitel bezpečnosti na mezi kluzu

$n_m = 2,6$ – součinitel bezpečnosti na mezi pevnosti

4.5.1. Stěna centrálního pláště 2

V návrhu tloušťky eliptického klenutého a válcového dna vycházím z teorie tenkostěnných skořepin namáhaných přetlakem.

Připustíme-li dovolené napětí σ_D a uvažíme snížení pevnosti součinitel φ , dostaneme výpočtovou tloušťku stěny s_R a nominální tloušťka stěny s .

Ve výpočtu je zařazena jako první protože není zeslabena žádným otvorem a tedy součinitel zatížení pevnosti $\varphi = 1$.

$$sR = \frac{p \cdot D_v \cdot m_3 \cdot \sigma D \cdot \varphi - p}{(m_2 \cdot (m_1 \cdot \sigma D \cdot \varphi - p))} \cdot a \quad s \geq sR + c \quad (12)$$

Obecný vztah pro výpočet sR , kde :

tab 4.9

Část nádoby KO	m1	m2	m3
Válcový plášť	2	1	1
Eliptické dno	4	1	1,988

Výpočtová tloušťka stěny pláště 2 :

$$sR2 = 152 \text{ [mm]}$$

$$\varphi2 = 1$$

$$D_v = 4,218 \text{ [mm]}$$

$$\text{tloušťka návarů } 9 \text{ [mm]}$$

Výpočtový vnitřní průměr D_v = navržený vnitřní průměr D + 2. tloušťka návarů.

4.5.2. Stěna centrálního pláště 3 a vrchního pláště 1

Stěna je zeslabena otvory pro hrdla stavoznaků a pomocných termočlánků. Podle vypočtené tloušťky stěny a korekci podle výrobce, volím nominální tloušťku stěny : $sN = 156 \text{ [mm]}$, výrobní a provozní přípravek volím $c = 0 \text{ [mm]}$

Minimální dovolená hodnota koeficientu oslabení:

$$\varphi0 = p \cdot \frac{(D \cdot m_3 + (sN - c))}{(m_1 \cdot (m_2 \cdot (sN - c)))} \cdot \sigma D \quad (13)$$

$$\varphi_0 = 0,97$$

pro $0,66 < \varphi_0 < 1$ nesmí průměr nevyužitého otvoru přesahovat mezní hodnotu:

$$d_{mez} = \left(\frac{1,6}{\varphi_0} - 1,4 \right) \cdot \sqrt{(Ds \cdot (sN - c))} = 0,3 \text{ [m]} \quad (14)$$

Střední průměr pláště

$$Ds = D_v + sN = 4,374 \text{ [m]} \quad (15)$$

Maximální průměr otvoru

$$d_{max} = 0,038 \text{ [mm]} \ll d_{mez} = 0,305 \text{ [mm]}$$

Koeficient zeslabení skupinou otvorů pro obvodový směr

$$\varphi = 2 \cdot \frac{(l_1 - d_{max})}{l_1} = 1,77 \quad (16)$$

Vzdálenost os otvorů v plášti $l_1 = 342 \text{ [mm]}$

$$\varphi = 1,77 > \varphi_0 = 0,97$$

Otvory plášťů 1 a 3 není nutno vyztužovat. Plášť 1 má stejné rozmístění menších otvorů a tím pádem tedy vyhovuje.

4.5.3. Výpočet stěny vrchního dna

Výpočtová tloušťka stěny s_R :

$$s_R = \frac{p \cdot D_v \cdot m_3 \cdot \sigma_D \cdot \varphi - p}{(m_2 \cdot (m_1 \cdot \sigma_D \cdot \varphi - p))} \cdot a \quad s > s_R + c \quad (17)$$

Obecný vztah pro výpočet sR , kde :

tab 4.10.

Část nádoby KO	m1	m2	m3
Válcový plášť	2	1	1
Eliptické dno	4	1	1,988

$$sR2 = 147 \text{ [mm]}$$

$$\varphi = 1$$

technický přípravek volím 4 [mm]

$$sN = 165 \text{ [mm]}$$

podmínky platnosti výpočtu :

$$\frac{bv}{Dv} = 0,248 > 0,2$$

$$\frac{(sN - c)}{Dv} = 0,053 < 0,1$$

Rozměry otvorů vrchního dna :

$$dn1 = 238 \text{ [mm]}$$

$$dn2 = 238 \text{ [mm]}$$

$$dn3 = 468 \text{ [mm]}$$

Minimální dovolená velikost koeficientu zeslabení vrchního dna

$$\varphi_0 = p. \frac{(D.m_3 + (sN - c))}{(m_1.(m_2.(sN - c)))} . \sigma D \quad (18)$$

$$\varphi_0 = 0,91$$

pro $0,66 < \varphi_0 < 1$ nesmí průměr nevyužitého otvoru přesahovat mezní hodnotu:

$$d_{mez} = \left(\frac{1,6}{\varphi_0} - 1,4 \right) \cdot \sqrt{((Ds \cdot (sN - c))} = 0,27 \text{ [m]} \quad (14)$$

Střední průměr pláště

$$Ds = D_v + sN = 4,365 \text{ [m]}$$

$$dn_1 = dn_2 < d_{mez}, dn_3 > d_{mez}$$

Otvory je nutno považovat za řadu otvorů, je-li splněna podmínka pro vzdálenost okrajů dvou sousedních otvorů.

$$l_c < \cdot \sqrt{((Ds \cdot (sN - c))} = 1431,73 \text{ [mm]} \quad (15)$$

Otvory 1 a3 nebo 2 a 3 :

vzdálenost otvorů

$$l = 1000 \text{ [mm]}$$

$$l_c = \frac{l - (dn_1 + dn_3)}{2} = 647 \text{ [mm]} \quad (16)$$

$$647 < 1431,73$$

Součinitel zeslabení pro otvory 1 a 3 nebo 2 a 3:

$$\varphi_{d1,d3} = \frac{l - dn}{l} = 0,647 \quad (17)$$

kde dn je střední průměr nátrubků 1 a 3

$$dn = \frac{dn_1 + dn_2}{2} = 353 \text{ [mm]} \quad (18)$$

Minimální zpevňující plocha pro otvory 1 a 3 nebo 2 a 3:

$$\sum_{1,3} = \frac{((\varphi_0 - \varphi_{d1,3}) \cdot (sN - c) \cdot dn)}{1 - \varphi_{d1,3}} = 43308,9 \text{ [mm}^2\text{]} \quad (19)$$

Součinitel zeslabení a minimální zpevněná plocha pro otvory 1 a 2 :

$$\phi_{d1,d2} = 0,762$$

$$\sum_{1,2,\min} = 24793,9 \text{ [mm}^2\text{]}$$

Tloušťka stěn nátrubků:

$$s_{R3} = 24 \text{ [mm]}$$

$$c = 0$$

Volím vnější průměr nátrubku :

$$d_{as3} = 730 \text{ [mm]}$$

$$s_{N3} = \frac{(d_{as3} + d_{n3})}{2} = 131 \text{ [mm]} \quad (20)$$

Výška zpevněné části nátrubku :

$$h_s = \sqrt{((d_{as} - s_N)) \cdot s_N} = 280 \text{ [mm]} \quad (21)$$

Plocha vyztužující nátrubek III :

$$\sum = 2 \cdot h_s \cdot (s_N - s_R - c) = 59920 \text{ [mm}^2\text{]} \quad (22)$$

Otvory 1 a 2 :

$$s_{R1,2} = 12 \text{ [mm]}$$

$$c = 0$$

Volím vnější průměr nátrubků :

$$d_{as1,2} = 420 \text{ [mm]}$$

$$s_{N1,2} = 91 \text{ [mm]}$$

$$h_{s1,2} = 173 \text{ [mm]}$$

$$\sum_{1,2} = 27334 \text{ [mm}^2\text{]}$$

Kontrola zpevnění :

$$\sum \sigma_3 = 59920 \text{ [mm}^2\text{]} > \sum \sigma_{1,3\min} = 43308 \text{ [mm}^2\text{]}$$

$$\sum \sigma_{1,2} = 27334 \text{ [mm}^2\text{]} > \sum \sigma_{1,2\min} = 24793,9 \text{ [mm}^2\text{]}$$

Kontrola skutečné zpevňující plochy:

$$\sum \sigma_{1,3} = \frac{(\sum \sigma_{1,2} - \sum \sigma_3)}{2} = 43627 \text{ [mm}^2\text{]}$$

$$\sum \sigma_{1,3} = 43627 \text{ [mm}^2\text{]} > \sum \sigma_{1,3\min} = 43308 \text{ [mm}^2\text{]}$$

4.5.4. Výpočet víka průlezu

tvarový koeficient $k = 0,6$

koeficient zeslabení víka $k_0 = 1$

rozteč středů otvorů pro šrouby $D_1 = 675 \text{ [mm]}$

Minimální tloušťka:

$$s_{Rv} = \left(\frac{k}{k_0} \right) \cdot \sqrt{\frac{p}{\sigma_D}} = 125,318 \text{ [mm]}$$

4.6. Výpočet stěny spodního dna

Na spodním dnu je rozmístěno 50 otvorů průměru 45mm pro TEO o pro přívod primárního chladiva o průměru 468 mm.

Výpočtová tloušťka stěny spodního dna :

$s_R = 147 \text{ [mm]}$ – volím 200 [mm]

$c = 4$

Rozsah platnosti výpočtu :

$$0,0025 < \frac{(sN - c)}{Dv} = 0,06494 < 0,1$$

$$0,2 < \frac{bv}{Dv} = 0,24851 < 0,5$$

Minimální vzdálenost mezi okraji otvorů je dosahováno na roztečné kružnici R_1 .

$R_1 = 960$ [mm] Tato vzdálenost je při počtu 25 otvorů 45 [mm].

$$l_{\min} = \frac{(2 \cdot \pi \cdot R_1 - 25 \cdot d)}{25} = 310 \text{ [mm]} \quad (23)$$

Podmínka pro osamělí otvor :

$$l_{\min} < 1588,37 \text{ [mm]}$$

$$Ds = Dv + sN = 3218 \text{ [mm]} \quad (24)$$

$$\phi_0 = 0,7567$$

Pro eliptická dna nesmí být porušeny tyto podmínky:

1) Úhel mezi hrdlem a normálou může být maximálně 45°

$$\gamma = \frac{\pi}{2} - \alpha = 0,57184 \text{ rad} = 32,7643^\circ < 45^\circ$$

$$\alpha = \arctg m = 0,99895 \text{ rad}$$

$$m = a_{v2} \cdot \frac{y}{b_{v2}} \cdot x = 1,55382$$

Souřadnice otvoru:

$$x = 1160 \text{ [mm]} \quad a_{v2} = 1509$$

$$y = 456 \text{ [mm]} \quad b_{v2} = 759$$

2) Vzdálenost osy od okraje dna musí být větší než:

$$\frac{D_v}{2 - R_2} = 349 > 0,1 \cdot D_v + \frac{d}{2} = 324,3 \text{ [mm]}$$

3) Podmínka platnosti výpočtu:

$$0,666 < \varphi_0 = 0,7567 = < 1$$

$$0,2 < \frac{b_v}{D_v} = 0,25149 = < 0,5$$

$$0,0025 < \frac{(sN - c)}{D_v} = 0,06494$$

Součinitel snížení pevnosti řadou otvorů na eliptickém dně v obvodovém směru:

$$\varphi_d = \frac{(l - d)}{l} \quad (25)$$

Vzdálenost otvorů :

-rozteč, kruž $l_k = 2 \cdot \pi \cdot R$

$d = 45 \text{ [mm]}$

$R_1 = 960 \text{ [mm]}$

$R_2 = 1160 \text{ [mm]}$

Pro první roztečnou kružnici:

$l_{kl} = 6032 \text{ [mm]}$

$l_1 = 241,28 \text{ [mm]}$

$\varphi_{d1} = 0,831 > \varphi_0$

Pro druhou roztečnou kružnici:

$l_{k2} = 7288 \text{ [mm]}$

$l_2 = 291,52 \text{ [mm]}$

$$\varphi_{d2} = 0,845 > \varphi_0$$

Součinitel snížení pevnosti na eliptickém dnu:

$$l_d = 240 \text{ [mm]}$$

$$\varphi_{d3} = 0,812 > \varphi_0$$

Pro vzdálenost od okrajů platí:

$$l = 703,5 \text{ [mm]} < l_{\min} = 1588,37$$

$$d_l = 468 \text{ [mm]}$$

Součinitel snížení pevnosti řadou ve směru otvorů:

$$\varphi = \frac{R_1 - dn}{R_1} = 0,732 \quad (26)$$

$$dn = \frac{dn + d}{2} = 256 \text{ [mm]} \quad (27)$$

Minimální zpevňující plocha pro otvory d_l a d :

$$\sum_{\min} = \frac{((\varphi_0 - \varphi) \cdot (sN - c) \cdot dn)}{1 - \varphi} = 4495,07 \text{ [mm}^2\text{]} \quad (28)$$

4.7. Nátrubek TEO

- 1) Uvnitř nádoby – mat. 08Ch18N10T (aust.návar)
- 2) Vně nádoby – mat. 10GN2MFA (základní mat)

Pro materiál 08Ch18N10T se σ_D určí jako menší z hodnot:

$$\sigma_D p = \frac{Rp}{np} = 118 \text{ [MPa]} \quad (29)$$

$$\sigma_{Dm} = \frac{Rm}{nm} = 124 \text{ [MPa]} \quad (30)$$

$$\sigma_D (\text{vyp.hod.}) = 118 \text{ [MPa]}$$

Volím: $n_p = 1,5$ – součinitel bezpečnosti na mezi kluzu

$n_m = 2,6$ – součinitel bezpečnosti na mezi pevnosti

dopočteme :

$$s_{R1} = 2,2 \text{ [mm]}$$

$$s_{R2} = 3,5 \text{ [mm]}$$

$$c = 0$$

$$s_{Nn} = 15 \text{ [mm]}$$

Výška zpevněné části nátrubku:

$$h_s = 30 \text{ [mm]}$$

$$d_{as} = d + 2 \cdot s_{Nn} = 75 \text{ [mm]} \quad (31)$$

$$h_{s1}, h_{s2} = 30 \text{ [mm]}$$

Vyztužená plocha nátrubků:

$$A_{s1} = 2 \cdot h_{s1} \cdot (s_{Nn} - s_{R1}) = 768 \text{ [mm}^2] \quad (32)$$

$$A_{s2} = 2 \cdot h_{s2} \cdot s_{Nn} = 900 \text{ [mm}^2]$$

$$\sum = A_{s1} + A_{s2} = 1668 \text{ [mm}^2] \quad (33)$$

Výpočtová tloušťka nátrubku primárního chladiva:

$$s_{R1} = 22,8 \text{ [mm]}$$

$$c = 0$$

Nominální tloušťku volím jako na vrchním dně:

$$s_{N1} = 131 \text{ [mm]}$$

Výška zpevněné části nátrubku:

$$h_s = 280 \text{ [mm]}$$

$$d_{as} = d_1 + 2 \cdot s_{N1} = 730 \text{ [mm]} \quad (34)$$

Plocha vyztužující nátrubek primárního chladiva:

$$\sum_{l_{ch}} = 2 \cdot h_s \cdot (s_{N1} - s_{R1} - c) = 60592 \text{ [mm}^2\text{]} \quad (35)$$

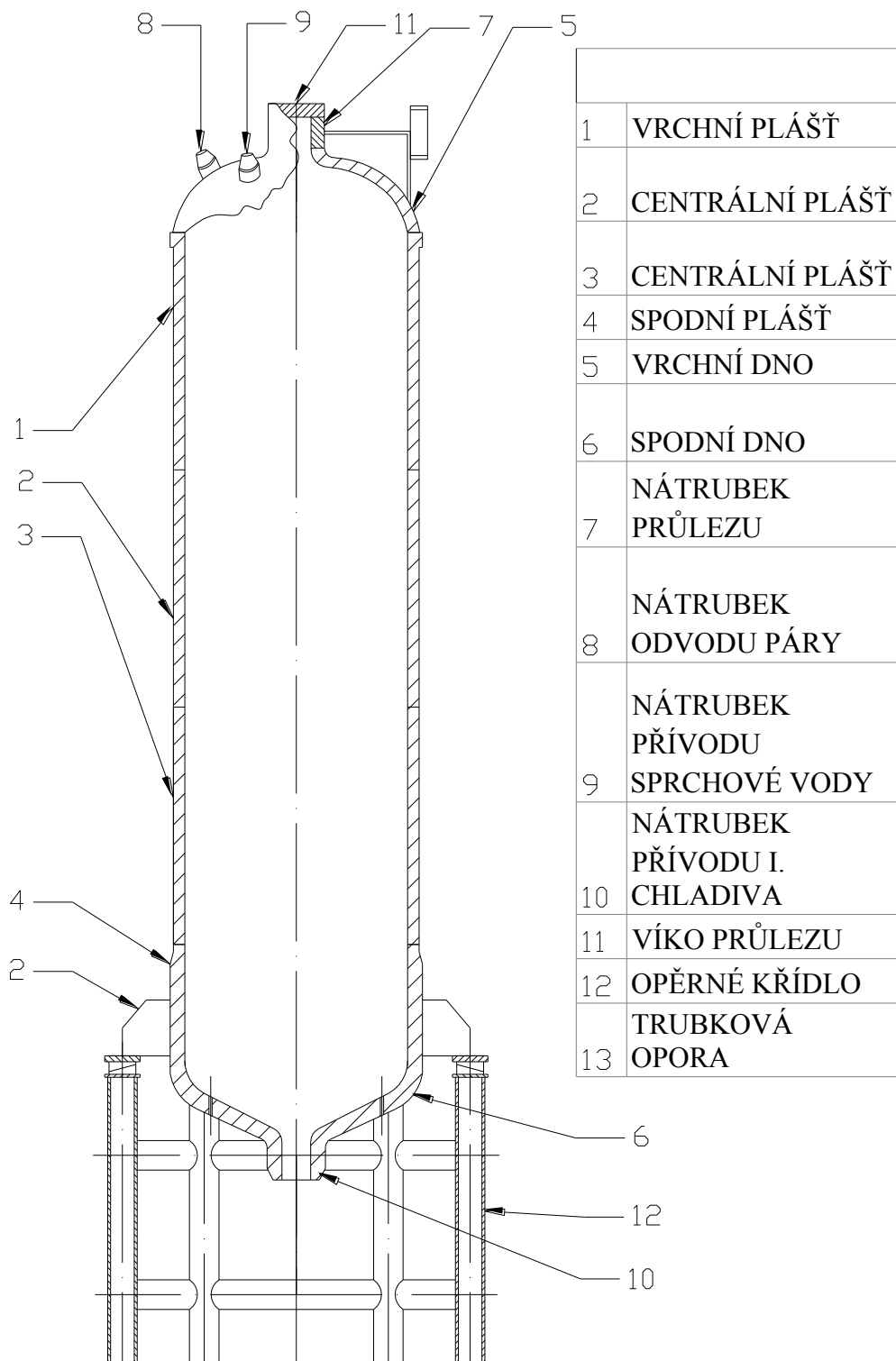
Plocha zpevňující nátrubky otvorů d_1 a d :

$$\sum_{d1,d} = \frac{(\sum_{l_{ch}} - \sum_{s_r})}{2} = 31130 \text{ [mm}^2\text{]} \quad (36)$$

Otvory spodního dna jsou dostatečně zpevněny:

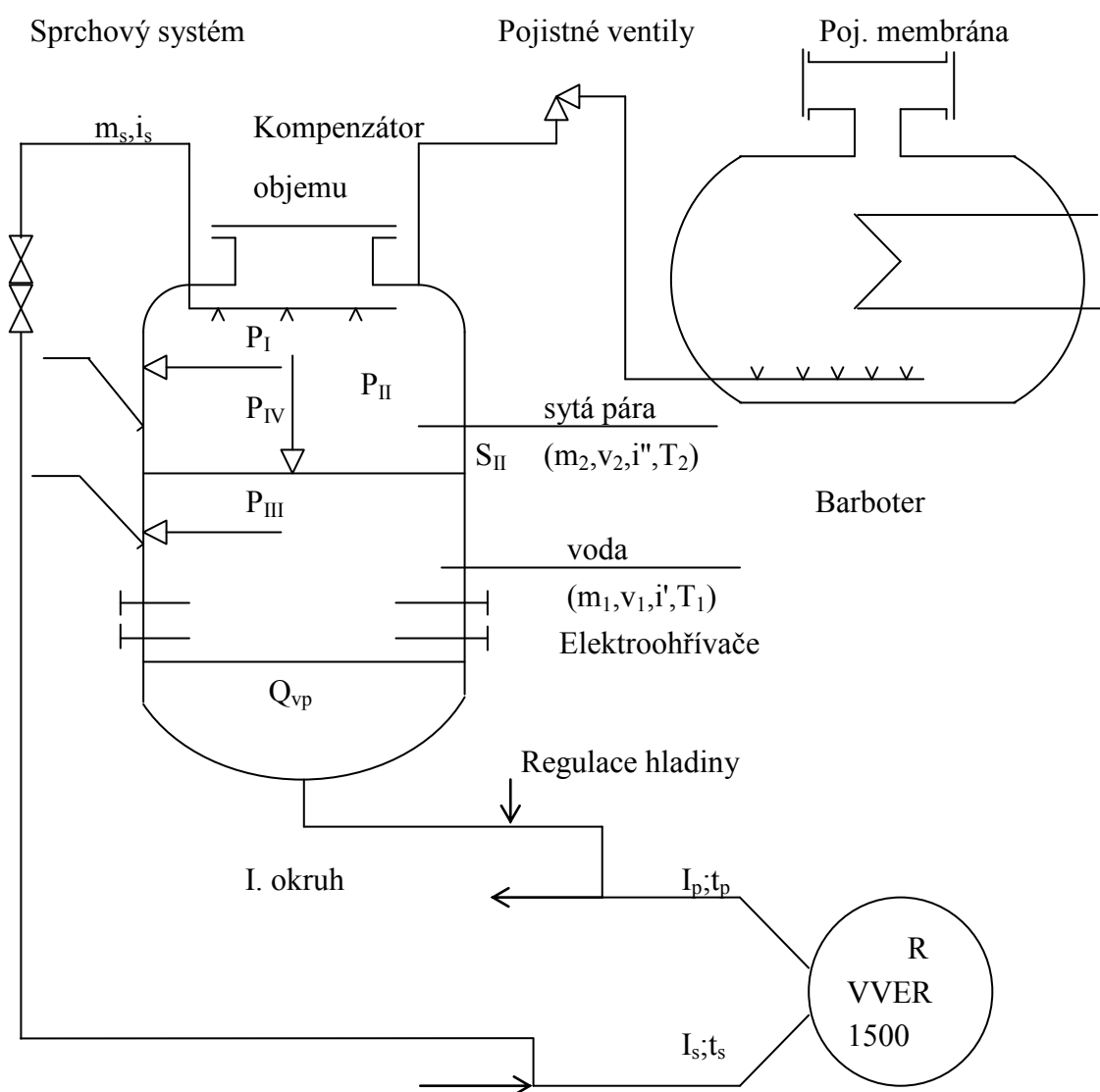
$$\sum_{d1,d} = 31130 \text{ [mm}^2\text{]} > \sum_{min} = 4495,06 \text{ [mm}^2\text{]} \quad (37)$$

4.6 . Výkres části kompenzátoru



5. Matematický model KO VVER 1500

Slouží ke spouštění, k udržování tlaku a omezení výchylek tlaku a objemu při změnách teplotního režimu během normálního provozu a k dochlazování primárního okruhu v režimu odstavení bloku. Dále slouží k pojištění primárního okruhu proti stoupnutí tlaku nad povolenou hodnotu.



5.1. Popis modelu kompenzátoru objemu

KO je součástí systému na udržování tlaku v I okruhu. Kompenzuje teplotní změny objemu I. chladiva v ustálených i přechodových režimech práce bloku. Svou funkcí zajišťuje vytvoření tlaku v okruhu při najíždění, udržování tlaku v zadaných mezích při normálních provozních režimech. Udržení tlaku v mezích podle technologických a pevnostních požadavků se dosahuje pomocí parního obsahu, sprchového systému, pojistných ventilů a elektroohříváčů.

Model KO musí pro potřeby výrobce popisovat podrobněji přechodové procesy než model při vyšetřování bezpečného provozu reaktoru. Při formování bilančních rovnic pro přenos energie a hmoty bylo uvažováno působení I. okruhu na KO s okrajovými podmínkami tak, aby bylo možné vytvořit model dynamiky I. okruhu. Vnitřní objem KO se uvažuje rozdělený na 3 vrstvy s časově proměnným objemem.

- a) chladivo vytlačené z I. okruhu po přechodovém procesu
- b) voda v KO nad vytlačeným chladivem
- c) sytá vodní pára nad hladinou vody

Z toho vyplývá zadání těchto vstupních údajů:

1. časové derivace změny objemu chladiva v I. okruhu
2. entalpie sprchovací vody
3. termodynamických vlastností chladiva vytlačeného z I. okruhu do KO

Voda v KO nad vytlačeným chladivem se skládá z části obsažené v KO už před začátkem přechodového procesu, z části dodané sprchovým systémem, z části způsobené kondenzací na sprchových kapkách, stěnách a hladině. Regulační systém pro udržení hladiny dodává anebo odebírá chladivo přímo z I. okruhu. Hmotnost vody se snižuje při varu v důsledku poklesu výkonu nebo činnosti elektroohříváčů.

V modelu byly uvažovány tyto zjednodušující předpoklady:

- před začátkem přechodového režimu je pára a voda v termodynamické rovnováze
- promísení I. chladiva s vodou se uvažuje a výměna tepla a hmoty rozhraním těchto vrstev je dokonalá

- uvažují se dva rozdílné režimy v závislosti na charakteru poruchy ze strany I. okruhu.

Nerovnovážný režim

Nastává při narušení stacionárního stavu zvětšováním objemu I. okruhu chladiva. Teploty vody a páry jsou rozdílné, tepelný tok na fázovém rozhraní se uvažuje úměrný rozdílu teplot a plochy hladiny. Entalpie vody je nižší než odpovídající entalpie syté vody při daném tlaku.

Rovnovážný režim

Předpokládá se při zmenšování objemu I. chladiva a průtoku vody z KO do I. okruhu. Voda a pára jsou v dokonalé termodynamické rovnováze. Ke změně na rovnovážný režim dojde, když entalpie vody dosáhne hodnotu entalpie syté páry při daném tlaku.

Činnost sprchového, pojistného a ohřívacího systému

Průtok sprchovací vody je zadán jako funkce tlaku v KO a entalpie je funkcí tlaku a teploty ve studené větvi I. okruhu. Průtok páry pojistnými ventily se zadává jako funkce odchylky tlaku od počáteční hodnoty. Entalpie unikající páry je rovna entalpii na horní mezní křivce při daném tlaku. Tepelný výkon elektroohříváčů se zadává rovněž v závislosti na tlaku v KO s předpokladem, že celý tepelný výkon se dodává do vodního objemu.

Výměna tepla se stěnami

V termodynamicky nerovnovážném režimu je výměna tepla mezi párou a stěnami dána předpokladem suché syté páry v parním prostoru. Na vnitřním prostoru vzniká konvekce, kde součinitel přestupu tepla se zadává jako vstupní hodnota. Přestupná plocha je funkcí výšky a hladiny. Vypočítává se střední teplota stěny KO, kde se bere celková hmotnost KO s jeho tepelnou kapacitou. Venkovní stěna je tepelně izolována.

5.2. Matematický model

Pro stanovení časové závislosti termodynamických parametrů chladiva v KO jsou bilanční rovnice pro objem, hmotnost a energii uvažovány s pohyblivými hranicemi s časovou změnou objemu I. chladiva. Při termodynamicky nerovnovážném režimu se bilanční rovnice píší zvlášť pro parní a vodní objem a uvažuje se vzájemné působení mezi nimi. V rovnovážném stavu se rovnice formují společně pro objem vody a páry v KO.

Parametry KO jsou ovlivňovány:

1. časovou změnou objemu I chladiva Q_{vp} , která je závislá na změně středního tlaku a teploty v I. okruhu - p_I, t_I ; hmotový tok vody z I okruhu je \dot{m}_p , měrný objem V_p
2. tepelný výkonem elektroohříváčů P_e
3. dodávkou sprchovací vody s průtokem \dot{m}_s e entalpií i_s
4. únikem chladiva přes pojistné ventily \dot{m}_v

5.2.1. Popis nerovnovážného stavu

Změna objemu vytlačeného I chladiva je popsána rovnicí :

$$Q_{vp} = f(\tau) = (\dot{m}_p + \dot{m}_r) \cdot v_p = f(p_I, t_I) \quad [\text{m}^3 \text{s}^{-1}] \quad (38)$$

Zadáva se jako vstupní veličina v závislosti na čase, respektive na středním tlaku a teplotě v I okruhu. Hmotnost vody v KO s I chladivem se zvětšuje dodávkou vody ze sprchového systému a také v důsledku kondenzace páry na vodní hladině, sprchových kapkách a stěnách a snižuje v důsledku odparu při činnosti elektroohříváčů.

$$\dot{m}_1 = \dot{m}_s + \dot{m}_{ch} + \dot{m}_K + \dot{m}_h - \dot{m}_e + \dot{m}_p + \dot{m}_r \quad [\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}] \quad (39)$$

Hmotnost vody zkondenzované na sprchových kapkách za čas se určí dle vztahu

$$\dot{m}_{ch} = \frac{\dot{m}_s (i' - i_s)}{i'' - i'} \quad [\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}] \quad (40)$$

kde předpokládáme, že na hladinu dopadne sytá voda.

Činností elektroohříváčů vzniká pára

$$\dot{m}_e = \frac{P_e}{i'' - i'} \quad [\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}] \quad (41)$$

Tepelný výkon předcházející z páry do stěny je dán vztahem

$$P_I = \alpha_I \cdot S_I \cdot (T'' - T_s) \quad [\text{W}] \quad (42)$$

kde S_I je plocha stěn KO nad hladinou a je funkcí výšky hladiny. Součinitel přestupu tepla se volí $0,3 \text{ kW/m}^2\text{K}^{-1}$.

Hmotový tok zkondenzované vody ze stěn

$$\dot{m}_K = \frac{P_I}{i'' - i'} \quad [\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}] \quad (43)$$

Tepelný výkon z páry na hladinu

$$P_{II} = \alpha_{II} \cdot S_{II} \cdot (T'' - T_1) \quad [\text{W}] \quad (44)$$

kde S_{II} je plocha hladiny a součinitele přestupu tepla byl zvolen $100[\text{kW/m}^2\text{K}^{-1}]$.

Na hladině dochází ke kondenzaci

$$\dot{m}_h = \frac{P_{II}}{i'' - i'} \quad [\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}] \quad (45)$$

Změnu celkového množství hmoty v KO lze určit podle vztahu

$$\dot{m} = \dot{m}_1 + \dot{m}_2 = \dot{m}_s + \dot{m}_v - \dot{m}_p + \dot{m}_r \quad [\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}] \quad (46)$$

Odvedený tepelný výkon z vody do stěn je určen vztahem

$$P_{III} = \alpha_{III} \cdot S_{III} \cdot (T_1 - T_s) \quad [\text{W}] \quad (47)$$

kde S_{III} je plocha stěn KO pod hladinou a součinitel přestupu tepla α_{III} je volen $[\text{kW/m}^2 \text{K}^{-1}]$.

Tepelný výkon dodávaný z páry do stěny v nerovnovážném stavu pro její udržení na mezi sytosti určíme

$$P_{IV} = m_2 \cdot \left(\frac{di''}{dp} - v'' \right) \cdot \dot{p} \quad [\text{W}] \quad (48)$$

Pak se změna střední teploty stěny KO se vypočte

$$\dot{T}_s = \frac{P_I + P_{III} + P_{IV}}{C_s} \quad [^\circ\text{C}] \quad (49)$$

kde C_s je měrná tepelná kapacita KO

$$\dot{C}_s = m_K \cdot 0,5 \cdot c_{Fe} \quad [\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}] \quad (50)$$

Výsledná diferenciální rovnice pro časovou změnu tlaku páry je

$$\dot{p} = \frac{\dot{m}_2 \cdot v'' - \dot{V}_2}{m_2 \cdot \frac{dv''}{dp}} \quad (51)$$

$$\text{kde} \quad \dot{m}_2 = \dot{m} - \dot{m}_1 = \dot{m}_e - \dot{m}_{ch} - \dot{m}_K - \dot{m}_v - \dot{m}_h$$

Funkce E_3 se definuje jako

$$E_3 = E_1 \cdot \left(\frac{di''}{dp} - v'' \right) - \frac{dv''}{dp} \quad (52)$$

$$E_1 = \frac{v'' - v'}{i'' - i'} \quad (53)$$

Změnu entalpie vody za čas určíme (54)

$$\frac{di}{d\tau} = \frac{P_e + P_{II} - P_{III} + (\dot{m}_s + \dot{m}_{ch} + \dot{m}_K + \dot{m}_h) \cdot (i' - i_1) + (\dot{m}_p + \dot{m}_r) \cdot (i_p - i_1)}{m_1} + v_1 \cdot \dot{p}$$

Střední entalpie chladiva v KO

$$i = \frac{m_1 \cdot i_1 + m_2 \cdot i''}{m} \quad [\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}] \quad (55)$$

a její změna

$$\frac{di}{d\tau} = \frac{(m_1 \cdot i_1 + m_1 \cdot \frac{di_1}{dp} + \dot{m}_2 \cdot i'' + m_2 \cdot \frac{di''}{dp})m - \dot{m}(m_1 \cdot i_1 + m_2 \cdot i'')}{m^2} \quad (56)$$

Změna výšky hladiny v KO se určí

$$\frac{dL}{d\tau} = (m_1 \cdot \frac{dv_1}{dp} \cdot \dot{p} - v_1 \cdot \dot{m}_1) \cdot S_{II} \quad (57)$$

Přítok (odtok) I chladiva je v modelu řešen jako funkce střední teploty a tlaku v I okruhu a činnosti sprchového systému odebírajícího vodu ze studené větve I okruhu

$$m_p = \frac{V_I \cdot (v_0 - v_1)}{\tau_1 - \tau_0} - \dot{m}_s \quad [\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}] \quad (58)$$

kde V_Iobjem chladiva v I okruhu

V_0měrný objem na počátku kroku

V_1měrný objem na konci kroku

$\tau_1 - \tau_0$ délka kroku

Rovnice (1), (2), (9), (12), (14), (17), (19), (20) tvoří systém osmi diferenciálních

rovnice pro řešení přechodových jevů v KO.

Při splnění podmínky $i_1 > i''$ přejde nerovnovážný režim v rovnovážný.

5.2.2. Popis rovnovážného stavu

Bilanční rovnice se formulují společně pro vody a páry v KO. V platnosti zůstávají rovnice (1), (2), (9), (12), (17), (20).

Časová změna tlaku se počítá z rovnic energetické bilance pro celý objem a má tvar

$$p = \frac{E_1(P_e - P_l - P_{III} + \dot{m}_s(i_s - i) - \dot{m}_v(i'' - i) + (\dot{m}_r + \dot{m}_p)(i' - i) + v\dot{m}}{m_1E_2 + m_2E_3} \quad (59)$$

kde

$$E_2 = E_1 \cdot \left(\frac{di'}{dp} - v' \right) - \frac{dv'}{dp} \quad (60)$$

Změna střední entalpie

$$\frac{di}{d\tau} = \frac{P_e - P_l - P_{III} + \dot{m}_s(i_s - i) - \dot{m}_v(i'' - i) + (\dot{m}_p - \dot{m}_r)(i' - i)}{m} + v \cdot p \quad (61)$$

když

$$x = \frac{i - i'}{i'' - i'} \quad (62)$$

$$v = v' + x \cdot (v'' - v') \quad (63)$$

Diferenciální rovnice pro rovnovážný a nerovnovážný stav tvoří uzavřený systém, který je řešitelný procedurami pro výpočet :

$$i' ; i'' ; v' ; v'' ; T = f(p)$$

$$v; T=f(p)$$

Tento program je již zpracován pro modelování stavu kompenzátoru objemu jaderné elektrárny VVER 440 a VVER 1000. Rozlišení obou typu je dáno počátečními podmínkami. K odvození rovnic bylo použito Newtonova obecného interpolačního polynomu:

$$p(x) = f_0 + f[x_1, x_0](x - x_0) + f[x_2, x_1, x_0](x - x_0)(x - x_1), \quad (64)$$

5.3. Výpis z programu Matlab

Program je zpracován pro typ VVER-1500 pro modelování stavu KO. Procesy, které probíhají, jsou v KO popsány osmi diferenciálními rovnicemi. Jejich řešení získáme závislosti výšky hladiny a tlaku na čase. Program je zpracován v programu Matlab a je rozdělen do několika podprogramů a hlavního programu.

Tlak	Teplota	Měrný objem		Entalpie	
		vody	syté páry	vody	syté páry
p(Mpa)	t"(°C)	v'(m ³ kg ⁻¹)	v''(m ³ kg)	i'(kJkg ⁻¹)	i''(kJkg ⁻¹)
1	179,88	0,0011273	0,1946	762,2	2778
1,2	187,95	0,0011385	0,1633	798,3	2785
1,4	195,04	0,0011490	0,1408	830	2790
1,6	201,36	0,0011586	0,1238	858,3	2793
1,8	207,1	0,0011687	0,1104	884,4	2796
2	212,37	0,0011766	0,09958	908,5	2799
2,2	217,24	0,0011851	0,09068	930,9	2801
2,4	221,77	0,0011932	0,08324	951,8	2802
2,6	226,03	0,0012012	0,07688	971,7	2803
2,8	230,04	0,0012088	0,07141	990,4	2803
3	233,83	0,0012163	0,06665	1008,3	2804
3,5	242,54	0,0012345	0,05704	1049,8	2803
4	250,33	0,0012520	0,04977	1087,5	2801
5	263,91	0,0012657	0,03944	1154,4	2794
6	275,56	0,0013165	0,03243	1213,9	2785
7	285,8	0,0013510	0,02737	1267,4	2772
8	294,98	0,0013838	0,02352	1317	2758
9	303,32	0,0014174	0,02046	1363,7	2743
10	310,96	0,001452	0,01803	1407,7	2725
11	318,04	0,0014890	0,01598	1450,2	2705
12	324,63	0,0015270	0,01426	1491,1	2685
13	330,81	0,0015670	0,01277	1531,5	2662
14	336,63	0,0016110	0,01149	1570,8	2638
15	342,11	0,0016580	0,01035	1610	2611
16	347,32	0,0017100	0,00932	1650	2582
17	352,26	0,0017680	0,006382	1690	2548
18	356,96	0,0018370	0,007504	1732	2510
19	361,44	0,0019210	0,00668	1776	2466
20	365,71	0,0020400	0,00585	1827	2410
21	369,79	0,0022100	0,00498	1888	2336
22,129	374,15	0,0032600	0,00326	2100	2100

'clear'

e1- výpočet funkce e1 závislé na tlaku

`function e1=e1(p);`

`'e1=(vsp(p)-vsv(p))/(isp(p)-isv(p))';`

e3- výpočet funkce e3 závislé na tlaku

`function e3=e3(p);`

`'e3=((vsp(p)-vsv(p))/(isp(p)-isv(p))*(ispdp(p)-vsp(p))-vspdp(p))';`

ip- funkce pro výpočet entalpie chladiva vtékajícího resp. Odtékajícího do KO
závislá na teplotě studené a horké větve primárního okruhu

`function ip=ip(thot,tstud);`

`'tpp=(tstud+thot)/2';`

`'ip=0.0128*tpp^2-2.0365*tpp+797.74';`

isp- funkce entalpie syté páry, závislost na tlaku

`function isp=isp(p);`

`'isp=-2.85403806906004E-04*p^6 + 1.78401318297148E-02*p^5 -
4.32836549213398E-01*p^4 + 5.14198589522320E+00*p^3 -
3.206929911384436E+01*p^2 + 9.13294887424962E+01*p +
2.71143359128066E+03';`

ispdp- derivace entalpie syté páry podle tlaku

`function isdpdp=ispdp(p);`

`'ispdp=-1.712422841E-3*p^5+0.089200659*p^4-
1.731346197*p^3+15.42595769*p^2-64.13858226*p+9.13294887424962E1';`

istud- entalpie studené větve v závislosti na tlaku

`function istud=istud(tstud);`

`'istud=0.0128*tstud^2 - 2.0365*tstud + 797.74';`

isv- entalpie syté vody v závislosti na tlaku

function isv=isv(p);

```
'isv=1.47727643394546E-04*p^6      -      7.28853251388273E-03*p^5      +  
1.06215996658051E-01*p^4      +      8.74274802753234E-02*p^3      -  
1.52766917246719E+01*p^2      +  
1.74787884529474E+02*p^+6.12850677237333E+02';
```

isvdp- derivace entalpie syté vody podle tlaku

function isvdp=isvdp(p);

```
'isvdp=0.0008863658598*p^5      -      0.036442662*p^4      +      0.424863986*p^3      +  
0.26228244*p^2      -      30.55338344*p+1.747884529474E+02';
```

me- hmotnostní přírůstek vody v důsledku činnosti elektroohříváčů v závislosti na tlaku a jeho derivaci

function me=me(p,dp);

```
eo4=15.7;      %zapínací tlak elektroohříváků s výkonem : 1781 kw  
eo3=15.9;      %zapínací tlak elektroohříváků s výkonem : 890 kw  
eo2=16;        %zapínací tlak elektroohříváků s výkonem : 445 kw  
eo1=16,2;      %zapínací tlak elektroohříváků s výkonem : 445 kw  
eo4=15.9;      %zapínací tlak elektroohříváků s výkonem : 1781 kw  
eo3=16;        %zapínací tlak elektroohříváků s výkonem : 890 kw  
eo2=16.15;     %zapínací tlak elektroohříváků s výkonem : 445 kw  
eo2=16.25;     %zapínací tlak elektroohříváků s výkonem : 445 kw  
me1=270;       %průtočné množství v kg/s  
me2=270;       %průtočné množství v kg/s  
me3=720;       %průtočné množství v kg/s  
me4=1260;      %průtočné množství v kg/s  
if dp>0  
    if p>=ez1  
        e=0;  
    else if p<ez1&p>ez2  
        e=me1;
```

```

        else if p<=ez2&p>ez3
e=me2+me1;
            else if p<=ez3&p>ez4
e=me2+me1;
e=0;
e=me1+me2+me3;
                else if p<=ez4
e=me1+me2+me3+me4;
end
    end
        end
if dp<=0
if p>eo1
e=0;
    else if p<eo1&p>eo2
e=me1;
        else if p<=eo2&p>eo3
e=me1+me2;
            else if p<=eo3&p>eo4
else if p<eo1&p>eo2
e=me1+me2+me3;
                else if p<=eo4
e=me1+me2+me3+me4;
end
    end
        end
            end
                end
me=e/(isp(p)-isv(p));
function mh=mh(p,i1);
a2=100;

```

```

d=4.2;
mh=(3.1415*d^2)/4*a2*(tsp(p)-t1(i1))/(isp(p)-isv(p));
function mch=mch(p,dp,tstud);
mch=(ms(p,dp)*(isv(p)-istud(tstud)))/(isp(p)-isv(p));
function mr=mr(L);
H=12.84;          %počáteční výška hladiny
dh=L-H;
if dh>0.4
mr=-15;
else if dh<0.4&dh>=0
mr=-37.5*dh;
        else if dh>-0.3&dh<0
mr=-50*dh;;
        else if dh<=-0.3
mr=15;
end
        end
        end
function ms=ms(p,dp);

```

% Sprchový systém

```

so1=16.1;          %otevírací tlak pro sprchy s průtokem 30kg/s
so2=16.3;          %otevírací tlak pro sprchy s průtokem 15kg/s
sz1=15.8;          %otevírací tlak pro sprchy s průtokem 30kg/s
sz2=16.1;          %otevírací tlak pro sprchy s průtokem 15kg/s
ms1=30;            %průtočné množství v kg/s
ms2=15;            %průtočné množství v kg/s
if dp>0
if p<so1
ms=0;
else if p>=so1&p<so2

```

```

ms=ms1;
                else if p>=so2
ms=ms1+ms2;
end
    end
        end
if dp<=0
if p<=sz1
ms=0;
else if p>sz1&p<sz2
ms=ms1;
                else if p>=sz2
ms=ms1+ms2;
end
    end
        end
function mv=mv(p,dp);

```

%Pojistné ventily

```

po1=17.2;          %otevřací tlak pojistných ventilů s průtokem 50 kg/s
po2=17.6;          %otevřací tlak pojistných ventilů s průtokem 150 kg/s
pz1=16.9;          %zavírací tlak pojistných ventilů s průtokem 50 kg/s
pz2=17.3;          %zavírací tlak pojistných ventilů s průtokem 150 kg/s
mpv1=50;           %průtočné množství v kg/s
mpv2=150;          %průtočné množství v kg/s
if dp>0
if p<po1
mv=0;
else if p>=po1&p<po2
mv=mpv1;

```



```

else if p>=po2
mv=mpv2;
end
end
end

if dp<=0
if p<pz1
mv=0;
else if p>=pz1&p<pz2
mv=mpv1;
else if p>=pz2
mv=mpv2;
end
end
end

function s1=s1(L);
d=4.2; %průměr kompenzátoru objemu
Vkom=18.45; %vnitřní výška kompenzátoru objemu
s1=3.1415*d*(Vkom-L);
function s2=s2(L);
d=4.2; %průměr kompenzátoru objemu
Vkom=18.45; %vnitřní výška kompenzátoru objemu
s2=pi*d*(Vkom-L);
function s3=s3(L);
d=4.2; %průměr kompenzátoru objemu
s3=pi*d*L;
function t1=t1(i1);
t1=-8E-05*i1^2 + 0.3897*i1 - 80.782;
function tsp=tsp(p);
'tsp=-2.28170665401706E-05*p^6 + 1.79242379930855E-03*p^5 -
5.63483979145722E-02*p^4 + 9.12742893372993E-01*p^3 -

```

```
8.33594879395028E+00*p^2      +      5.00020073584045E+01*p      +
1.38669087067872E+02';
```

```
function t1dp=v1dp(p);
```

```
'v1dp=-0.000525008*p + 0.00220227596614';
```

```
function vsp=vsp(p);
```

```
'vsp=0.2349395366224530000*p^6 -(1.1877144961524800000';
```

```
function vspdp=vspdp(p)
```

```
'vspdp=-0.279041093*p^(-2.18771449615248)';
```

```
function vsv=vsv(p);
```

```
'vsv=1.405699197319000E-09*p^6      -      8.509210508397980E-08*p^5      +
1.953027946760180E-06*p^4      -      2.107141930007480E-05*p^3      +
1.078257794853330E+04*p^2      -      1.985427093002740E+04*p      +
1.266846440159470E+03';
```

```
function vsmdp=vsmdp(p);
```

```
'vsmdp=8.434195182e-9*p^5 - 4.254605254e-7*p^4 + 7.812111784e-6*p^3 -
6.32142579e-5*p^2 + 2.156515588e+4*p-1 - 1.98542709300274e-4';
```

```
function vv=vv(thot,tstud,pp);
```

```
tstred=(thot+tstud)/2;
```

```
'vv=3.086e-3-8.99017e-4*(374.1-tstred)^0.147166-3.9e-3*(385-tstred)^-1.6*(pp-
22.99)-7.18e-5';
```

```
function vv1=vv1(p);
```

```
clc
```

```
'vv1=3E-07*p^2 - 2E-05*p + 0.0018-0.0001';
```

```
% Vstupní údaje kompenzátoru objemu VVER 1500%
```

```
p(1)=16.2;      %počáteční tlak v MPa
```

```
V1(1)=71;      %objem vody v m3
```

```
V2(1)=29;      %objem páry v m3
```

```
alfa3=3;      %součinitel přestupu tepla voda- stěna
```

```
alfa1=0.3;      %součinitel přestupu tepla pára- stěna
```

```
alfa2=100;      %součinitel přestupu tepla pára- hladina
```

```
d=4.2;      %průměr kompenzátoru
```

```
L(1)=12.84;      %výška hladiny
```

```
Vkom=18.45;      %vnitřní výška kompenzátoru
```

```

Mkom=3225000; %celková hmotnost v kg
c=0.46509;    %měrné teplo železa
tss(1)=314,6;    %počáteční teplota stěny
i1(1)=1663.647548437;
dL(1)=0.001;
dp(1)=0.0001;
VI= 2.10451*10^5*0.0014174;
s2=pi*d^2/4;
Cs= 0.5 * Mkom * c;
clear;
clc;
cas=0;
qq=0;
format long;
vstupni_hod;
vstupni_hod2;
isv_(1)=isv(p(1));
isp_(1)=isp(p(1));
vsp_(1)=vsp(p(1));
isp_(1)=isp(p(1));
tsp_(1)=tsp(15.76630977656);
m2(1)=0;
M1(1)=V1(1) / vv1 (p(1));
M2(1)=V2(1) / vsp (p(1));
M(1)=M1(1)+M2(1);
i(1)=(M1(1)*i1(1)+M2(1)*isp(p(1)))/(M1(1)+M2(1));
ip(1)=ip(thot(1),tstud(1));
t1_(1)=t1(1662.647548437);
for j=2:601
    vsp_(j)=vsp(p(j-1));
    isp_(j)=isp(p(j-1));

```

```

tsp_(j)=tsp(p(j-1));
vsp_(j)=vsp(p(j-1));
isv_(j)=isv(p(j-1));
ispdp_(j)=ispdp(p(j-1));
isvdp_(j)=isvdp(p(j-1));
e1_(j)=e1(p(j-1));
e3_(j)=e3(p(j-1));
vsvdp_(j)=vsvdp(p(j-1));
vspdp_(j)=vspdp(p(j-1));
v1dp_(j)=v1dp(p(j-1));
vv1_(j)=vv1(p(j-1));
vv_(j)=vv(thot(j-1),tstud(j-1),pp(j-1));
ip_(j)=ip(thot(j-1),tstud(j-1));
ms_(j)=ms(p(j-1),dp(j-1));
mv_(j)=mv(p(j-1),dp(j-1));
me_(j)=me(p(j-1),dp(j-1));
mr_(j)=mr(L(j-1));
s1_(j)=s1(L(j-1));
s3_(j)=s3(L(j-1));
mch_(j)=mch(p(j-1), dp(j-1), tstud(j-1));
istud_(j)=istud(tstud(j-1));
mh_(j)=mh(p(j-1), i1(j-1));
t1_(j)=t1(i1(j-1));
mp_(j)=-25;
Pe_(j)=me_(j) * (isp_(j)-isv_(j));
mp_(j)=(VI*(vv_(j-1)-vv_(j)) / (T(j)- T(j-1))-ms_(j));
PI_(j)= alfa1 * s1(j) * (tsp (j) - tss(j-1));
PII_(j)= alfa2 * s2 * (tsp_(j) - t1_(j));
PIII_(j)= alfa3 * s3 * (t1_(j) - tss_(j));
PIV_(j)= m2(j-1) * (ispdp(j) - vsp(j))* dp(j-1);
dtss(j)= (PI_(j) + PIII_(j) + PIV(j))/ Cs;

```

```

tss(j)= tss(j-1) + dtss(j) * (T(j)- T(j-1));
mk(j)= PI_(j) / (isp_(j) - isv_(j));
m1_(j)=ms_(j) + mh_(j) + mch_(j) + mk_(j) mp_(j) + mr_(j)- me_(j);
m(j)=ms_(j) - mv_(j) + mp_(j) + mr_(j);
m2_(j)=me_(j) - mch_(j) - mk(j) - mv_(j) - mh_(j);
M1(j)= M1(j-1) + m1(j) * (T(j)- T(j-1));
M2(j)= M2(j-1) + m2(j) * (T(j)- T(j-1));
M(j)= M(j-1) + m(j) * (T(j)- T(j-1));
if>=15.7
%nerovnovážný stav
zz(j)=1;
V2(j)=-m1(j) * vv1_(j);
dp(j)= (m2(j) * vsp_(j) - V2(j))/ (M2(j)*e3_(j));
p(j)= p(j-1) + dp(j) * T(j) - T(j-1));
i(j)= (M1(j) * i1(j-1) + M2(j) * isp_(j) / M(j);
di1(j)=(Pe_(j) + PII_(j) - PIII(j) + (ms_(j) + mk_(j) + mh_(j) + mch_(j)) * (i(j) -
i1(j-1)) + (mr_(j) + mp_(j)) * (ip_(j) - i1(j-1)))/M1(j) - vv1_(j) *dp(j);
else
qq(j)=1;
%rovnovážný stav
x(j)= (i(j-1) - isv_(j)) / (isp(j) - isv_(j));
y(j)= vsv_(j) + x(j)* (vsp(j) - vsv(j));
e2(j)= (vsp_(j) - vsv_(j)) / (isp_(j) - isv_(j))*(isvdp_(j)-v(j))- vsvdp_(j);
dp(j)= (e1_(j) * (Pe_(j) - PI_(j)- PIII_(j) + ms_(j) * (istud_(j) - i(j-1))- mv_(j) *
(isp_(j) - i_(j-1))+ (mr_(j) + mp(j))* (isv_(j)- i(j-1))) + v(j)*m(j)) / (M1(j) * e2(j) +
M2(j) *e3(j));
p(j)= p(j-1) + dp(j) * (T(j) - T(j-1));
di(j)=(Pe_(j) - PI_(j)- PIII_(j) + ms_(j) * (istud_(j) - i(j-1))- mv_(j) * (isp_(j) - i_(j-
1))+ (mr_(j) + mp(j))* (isv_(j)- i(j-1))) / M(j) +v(j) * dp(j);
i(j)= i(j-1) + di(j) * (T(j) - T(j-1));
di1(j)=(Pe_(j) + PI_(j)- PII_(j) + ms_(j) * mk(j) - mh(j) + mch_(j)) * (i(j) - i1(j-
1))+ (mr_(j) + mp(j))* (isv_(j)- i1(j-1))) / M1(j) +vv1(j) * dp(j);

```

```

i1(j)= i1(j-1) + di1(j) * (T(j) - T(j-1));
end
dl(j)= (M1_(j) * vsvdp_(j) * dp(j) + m1(j))* vv1_(j)) *1/s2;
L(j)= L(j-1) + dL(j) * (T(j)- T(j-1));
cas(j)=cas(j-1)+ dt;
plot(cas,p)
if L(j)>18.45
'e1=(vsp(p)-vsv(p))/(isp(p)-isvp)';
disp ('kompenzátor zaplněn vodou');
break
end
if p(j)<19.73
disp ('zapnuta havarijní ochrana')
break
end
end
end

```

5.4. Vstupní parametry KO VVER 1500

tab.5.1. Parametry KO VVER 1500

Č. název	Ozn.	hodnoty	jednotky
1. počáteční tlak	P	16,2	MPa
2. objem vody	V_1	71	m^3
3. objem páry	V_2	29	m^3
4. přestup tepla voda-stěna	α_I	3	$kWm^{-2}K^{-1}$
5.přestup tepla pára- stěna	α_{II}	0,3	$kWm^{-2}K^{-1}$
6.přestup tepla pára-hladina	α_{III}	100	$kWm^{-2}K^{-1}$
7. průměr	d	4,2	m
8. výška hladiny	L	12,84	m
9. vnitřní výška KO	L	18,45	m
10.celková hmotnost	M_k	322500	kg
11. měrné teplo FE	C	0,46509	$KJkg^{-1}K^{-1}$
12. počáteční teplota stěny	T_s	314,6	$^{\circ}C$

6. Návrh sprchového systému

Při návrhu sprchového systému vycházím z rovnic 39, 40, 42, 43, 44, 45, 51

Z matematického modelu KO. Pro výpočet předpokládám tlak 16,7 MPa, Kdy je průtok sprchami minimální $\dot{m}_s = 45 \text{ [kg} \cdot \text{s}^{-1}]$, pojistné ventily jsou uzavřeny $\dot{m}_v = 0$, elektroohříváky nepracují $\dot{m}_e = 0$, množství prim. Chladiva přitékajícího respektive odtékajícího z KO se rovná $(\dot{m}_p + \dot{m}_r) = 0$

Změna množství vody

$$\dot{m}_1 = \dot{m}_s + \dot{m}_{ch} + \dot{m}_K + \dot{m}_h \quad (39)$$

Změna množství páry

$$\dot{m}_2 = -\dot{m}_{ch} + \dot{m}_K + \dot{m}_h \quad (39)$$

Časová změna tlaku v KO

$$\dot{p} = \frac{\dot{m}_2 \cdot v'' + \dot{m}_1 \cdot v_1}{m_2 \cdot E_3} \quad (51)$$

$$E_3 = \frac{v'' - v'}{i'' - i'} \cdot \left(\frac{di''}{dp} - v'' \right) - \frac{dv''}{dp}$$

Dosazením m_1 a m_2 rovnice pro p a algebraickými úpravami dostanu vztah pro výpočet průtoku sprchovým systémem

$$\dot{m} = \frac{\frac{\dot{p} \cdot \dot{m}_2 \cdot E_3}{v'' - v'} + \dot{m}_k + \dot{m}_h}{\frac{(i' - i_s)}{i'' - i'} + \frac{v_1}{v'' - v'}} \quad (65)$$

Vstupní údaje pro výpočet :

tab 6.1

T ₁	316,9	°C	L=	12,84	m
T _s	314,6	°C	m ₂ =	2362,8	kg
T''=	316,7	°C	S ₁ =	40,03	m ²
v''=	0,01177	kg.m ⁻³	S ₂ =	6,924	m ²
v ₁ =	0,001574	kg.m ⁻³	α ₁ =	0,3	kW.m ⁻² .K ⁻¹
i''=	2644	kJ.kg ⁻¹	α ₂ =	100	kW.m ⁻² .K ⁻¹
i' =	1552	kJ.kg ⁻¹			
E ₃ =	6,8256.10 ⁻⁴				
\dot{p} =	0,125				

Tepelný výkon přecházející z páry do stěny určím jako :

$$P_I = \alpha_I \cdot S_I \cdot (T'' - T_s) = 27,62 \text{ [kW]} \quad (42)$$

Vypočtený hmotový tok kondenzátu ze stěny :

$$\dot{m}_K = \frac{P_I}{i'' - i'} = 0,03 \text{ [kg.s}^{-1}\text{]} \quad (43)$$

Tepelný výkon přecházející z páry do vody při kondenzaci páry na vodní hladině :

$$P_{II} = \alpha_{II} \cdot S_{II} \cdot (T'' - T_1) = 128,48 \text{ [kW]} \quad (44)$$

Hmotový tok kondenzátu vzniklého kondenzací na hladině :

$$\dot{m}_h = \frac{P_{II}}{i'' - i'} = 0,14 \text{ [kg.s}^{-1}\text{]} \quad (45)$$

Maximální průtok sprchovým systémem vypočtu dle výše uvedeného vztahu při zvýšení tlaku :

$$\dot{m}_{s \max} = 45 \text{ [kg.s}^{-1}\text{]}$$

Při zvýšení tlaku $p = 0,116$ je nutný maximální průtok sprchovým systémem $\dot{m}_{s\max} = 45$
[kg.s⁻¹]

7. Návrh elektroohříváčů

7.1. Maximální výkon elektroohříváčů

K výpočtu použiji rovnice 39, 41, 42, 43, 44, 45, 51 matematického modelu KO. Předpokládám pokles tlaku na hodnotu 15,7 MPa, kdy je výkon elektroohříváčů maximální $P_e=3563$ kW, odvod páry pojistnými ventily je $\dot{m}_v=0$, množství vody přitékající sprchovým systémem $\dot{m}_s=0$ a tím i množství vody zkondenzované na sprchových kapkách $\dot{m}_{ch}=0$. Množství primárního chladiva přitékajícího, odtékajícího z KO je $(\dot{m}_p + \dot{m}_r) = 0$.

Tepelný výkon přecházející z páry do stěny určíme jako:

$$P_I = \alpha_I \cdot S_I \cdot (T'' - T_S) \quad [\text{W}] \quad (42)$$

Z něj vypočtu hmotový tok kondenzátu ze stěn:

$$\dot{m}_K = \frac{P_I}{i'' - i'} \quad [\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}] \quad (43)$$

Tepelný výkon přecházející z páry do vody při kondenzaci páry na vodní hladině spočítám jako:

$$P_{II} = \alpha_{II} \cdot S_{II} \cdot (T'' - T_1) \quad [\text{W}] \quad (44)$$

Hmotový tok kondenzátu vzniklého kondenzací na hladině:

$$\dot{m}_h = \frac{P_{II}}{i'' - i'} \quad [\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}] \quad (45)$$

Změna množství vody:

$$\dot{m}_1 = \dot{m}_K + \dot{m}_h - \dot{m}_e \quad [\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}] \quad (39)$$

Změna množství páry v KO:

$$\dot{m}_2 = \dot{m}_K - \dot{m}_h + \dot{m}_e = -\dot{m}_1 \quad [\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}] \quad (39)$$

Časová změna tlaku v KO:

$$\dot{p} = \frac{\dot{m}_2 \cdot v'' - \dot{m}_1 \cdot \dot{V}_1}{\dot{m}_2 \cdot E_3} \quad (51)$$

Funkce E_3 :

$$E_3 = \frac{v'' - v'}{i'' - i'} \cdot \left(\frac{di''}{dp} - v'' \right) - \frac{dv''}{dp}$$

Množství páry vzniklé činností elektroohříváčů:

$$\dot{m}_e = \frac{P_e}{i'' - i'} \quad [\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}] \quad (41)$$

Dosazením vztahů pro $\dot{m}_1, \dot{m}_2, \dot{m}_e$ do rovnice pro \dot{p} a algebraickými úpravami získám vztah pro výpočet výkonu elektroohřívачů:

$$P_e = \left(\frac{\dot{p} \cdot \dot{m}_2 \cdot E_3}{v'' - v'} + \dot{m}_k + \dot{m}_h \right) \cdot (i'' - i') \quad [\text{kW}] \quad (66)$$

Vstupní údaje:

tab. 7.1. Parametry pro zvýšení výkonu

$\dot{p} =$	0,125	°C	$L =$	12,84	m
$E_3 =$	$8,1 \cdot 10^{-4}$	°C	$m_2 =$	2362,8	kg
$T'' =$	311,2	°C	$S_1 =$	40,03	m ²
$v'' =$	0,01177	kg.m ⁻³	$S_2 =$	6,924	m ²
$v_1 =$	0,001574	kg.m ⁻³	$\alpha_1 =$	0,3	kW.m ⁻² .K ⁻¹
$i'' =$	2644	kJ.kg ⁻¹	$\alpha_2 =$	100	kW.m ⁻² .K ⁻¹
$i' =$	1552	kJ.kg ⁻¹	$\dot{m}_k =$	0,024	kg.s ⁻¹
$E_3 =$	$8,1 \cdot 10^{-4}$		$\dot{m}_h =$	0,13	kg.s ⁻¹
			$P_e =$	<u>3563</u>	kW

7.2. Návrh svislých trubkových elektroohřívачů umístěných ve spodním dně

Při návrhu svislých elektrických ohřívачů (dále jen TEO) jsem vycházel ze stávajících TEO pro kompenzátor objemu VVER 440 a 1000 MW, podle poskytnuté výkresové dokumentace 1-1103-40C "Blok elektroohřívачe".

Výhody tohoto řešení jsou:

1. Využití již ověřeného typu elektrických ohřívачů.
2. Velký průměr základního tělesa je nevhodný pro umístění ve spodním dně, s tím souvisí i tlustostěnné nátrubky elektrických ohřívачů.

7.2.1. Výpočet elektroohříváčů

Volené vstupní údaje pro výpočet (viz. obrázek 6.1.)

tab.7.2. Vstupní údaje pro navrhovanou délku topného odporu

L=	308	cm	Ro(500°C)=	1,158	$\Omega \cdot \text{mm}^2 \cdot \text{m}^{-1}$
d=	0,4	cm	Qc=	3563	kW
h=	0,8	cm	n=	50	
ds=	1,5	cm	dU1=	23,7	V
			U=	380	V

Materiál: slitina 20% Cr, 80% Ni, pracovní teplota 500°C

Výpočet výkonu jednoho elektroohříváče:

$$Q_j = \frac{Q_c}{n} = 71260 \text{ [W]} \quad (67)$$

Navrhovaná délka topného odporu:

$$l_d = \left(\frac{L}{h} \right) \cdot \sqrt{(\pi \cdot ds)^2 + h^2} + L = 2148 \text{ [cm]} \quad (68)$$

Zdrojové teplo:

$$Q = \frac{4 \cdot Q_j}{\pi \cdot d^2 \cdot l_d} = 263,9 \text{ [W} \cdot \text{cm}^{-3}] \quad (69)$$

Tepelný tok na povrchu vodiče:

$$P1 = Q \cdot \frac{d}{4} = 2,639 \text{ [W} \cdot \text{cm}^{-2}] \quad (70)$$

Úbytek napětí:

$$dU = dU1 \cdot \sqrt{P1} \cdot \sqrt{Ro} = 48,3 \text{ [V]} \quad (71)$$

Proud v TO:

$$I = \frac{Q_j}{(U - dU)} = 214 \text{ [A]} \quad (72)$$

Odpor TO:

$$R = \frac{U - dU}{I} = 1,55 \text{ } [\Omega] \quad (73)$$

Výpočtová délka TO:

$$ld1 = \frac{R}{S} = 2148 \text{ } [\text{cm}] \quad (74)$$

Vypočtená délka topného odporu musí vyhovovat podmínice:

$$ld1 = ld2 = \frac{Qj}{10 \cdot \pi \cdot d \cdot Pl} = 2148 \text{ } [\text{cm}] \quad (75)$$

7.2.2. Kontrola pracovní teploty elektroohříváčů a tepelných toků

tab.7.3. Vstupní údaje pro výpočet střední pracovní teploty

d1=	25	mm	L=	308	cm
d2=	19	mm	λ_{350} =	20,3	$\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$
d3=	16,6	mm	λ_{415} =	15,9	$\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$
d4=	13,4	mm	λ_{455} =	21,5	$\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$
d5=	4	mm	λ_{495} =	14	$\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$
			λ_{520} =	22,4	$\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$
			Qj =	71260	W

$$q1 = \frac{Qj}{\pi \cdot d1 \cdot L} = \frac{71260}{\pi \cdot 2,5 \cdot 308} = 29,5 \text{ } [\text{W} \cdot \text{cm}^{-2}] \quad (76)$$

$$ts1 = 350 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$q2 = \frac{Qj}{\pi \cdot d2 \cdot L} = \frac{71260}{\pi \cdot 1,9 \cdot 308} = 38,8 \text{ } [\text{W} \cdot \text{cm}^{-2}] \quad (77)$$

$$ts2 = \frac{q1 \cdot r2 \cdot \ln(r1/r2)}{\lambda_{350}} + ts1 = \frac{29,5 \cdot 10^4 \cdot 0,0095 \cdot \ln(1,25/0,95)}{20,3} + 350 = 388 \text{ } [^\circ\text{C}] \quad (78)$$

$$q3 = \frac{Qj}{\pi \cdot d3 \cdot L} = \frac{71260}{\pi \cdot 1,66 \cdot 308} = 44,4 \text{ } [\text{W} \cdot \text{cm}^{-2}] \quad (79)$$

$$ts3 = \frac{q2 \cdot r3 \cdot \ln(r2/r3)}{\lambda_{415}} + ts2 = \frac{38,8 \cdot 10^4 \cdot 0,0083 \cdot \ln(0,95/0,83)}{15,9} + 388 = 415 \text{ } [^\circ\text{C}] \quad (80)$$

$$q_4 = \frac{Q \cdot \frac{d_5}{4} \cdot \pi \cdot d_5 \cdot L}{\pi \cdot d_4 \cdot L} = \frac{Q \cdot d_5^2}{4 \cdot d_4} = \frac{263 \cdot 0,4^2}{4 \cdot 1,34} = 7,85 \text{ [W.cm}^{-2}] \quad (81)$$

$$ts_4 = \frac{q_3 \cdot r_4 \cdot \ln(r_3/r_4)}{\lambda_{455}} + ts_3 = \frac{44,4 \cdot 10^4 \cdot 0,0049 \cdot \ln(0,83/0,67)}{21,5} + 415 = 437 \text{ [}^\circ\text{C]} \quad (82)$$

$$q_5 = \frac{Q \cdot \frac{d_5}{4} \cdot \pi \cdot d_5 \cdot L}{\pi \cdot d_5 \cdot L} = \frac{Q \cdot d_5}{d_4} = 26,3 \text{ W.cm}^{-2}$$

$$ts_5 = \frac{q_4 \cdot r_4 \cdot \ln(r_4/r_5)}{\lambda_{495}} + ts_4 = \frac{7,85 \cdot 10^4 \cdot 0,0049 \cdot \ln(0,67/0,2)}{14} + 437 = 470 \text{ [}^\circ\text{C]} \quad (83)$$

$$to = \frac{Q \cdot r_5^2}{4 \cdot \lambda_{520}} + ts_5 = \frac{263 \cdot 10^6 \cdot 0,002^2}{4 \cdot 22,4} + 470 = 481 \text{ [}^\circ\text{C]} \quad (84)$$

Při řešení prostupu tepla jsem užil náhradu spirály prstencovou válcovou stěnou, přičemž kruhový průřez je rovnoploché s průřezem náhradním – obdélníkovým (znázorněno na obr 6.2). Výšku obdélníkového průřezu jsem zvolil:

$$h = 0,8 \text{ [cm]}$$

Odtud pak:

$$a = \frac{S}{h} = 1,57 \text{ [mm]} \quad (85)$$

Průměry d_3 a d_4 :

$$d_3 = ds + a = 16,6 \text{ [mm]} \quad (86)$$

$$d_4 = ds - a = 13,4 \text{ [mm]} \quad (87)$$

Střední pracovní teplotu určím jako:

$$ts_{\text{tr}} = \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{(ts_3 + ts_4)}{2} + \frac{(ts_5 + to)}{2} \right) = 450 \text{ [}^\circ\text{C]} \quad (88)$$

Střední pracovní teplota souhlasí s únosnou tolerancí s předem zvolenou hodnotou 500°C, pro kterou byl určen měrný odpor $R_o(500^\circ\text{C})$.

Navržený materiál umožňuje užití do pracovní teploty 1050°C, je možné jej pro TEO použít.

7.2.3. Návrh ocelového pláště TEO

Materiál pláště volím ocel 3Ch13 jakostní třídy KP-60B. Pevnostní charakteristiky jsou v tabulce 7.4 .

tab. 7.4. Pevnostní charakteristiky.

3Ch13 KP - 60B		Teplota ve °C	
		20	350
Rm	MPa	785	620
Rp	MPa	590	550

Dovolená napětí se určí jako menší z hodnot:

$$n_m = 2,6$$

$$n_p = 2$$

$$\sigma_{Dm} = \frac{R_m}{n_m} = 238 \text{ [MPa]} \quad (89)$$

$$\sigma_{Dp} = \frac{R_p}{n_p} = 275 \text{ [MPa]} \quad (90)$$

$$\sigma_D = 238 \text{ [MPa]}$$

Výpočtová tloušťka stěny dna (obr. 6.3.):

$$s_r = K \cdot D_R \cdot \sqrt{\frac{p}{\sigma_D}} = 1,8 \text{ [mm]} \quad (91)$$

$$p = 18 \text{ [MPa]}$$

$$\text{součinitel: } K = 0,35$$

$$\text{výpočtový průměr } D_R = 19 \text{ [mm]}$$

$$\text{Nominální tloušťka stěny dna: } c = 1,2 \text{ [mm]}$$

$$s_N = s_R + c = 3 \text{ [mm]} \quad (92)$$

Podmínka platnosti vztahu:

$$\frac{(s_N - c)}{D_R} = 0,095 < 0,1$$

Výpočtová tloušťka stěny válcového pláště:

$$s_R = 0,73 \text{ mm pro } \varphi = 1$$

Nominální tloušťka stěny pláště: $c = 2,27 \text{ [mm]}$

$$sN = sR + c = 3 \text{ [mm]} \quad (93)$$

Podmínky platnosti vztahu:

$$\frac{(sN - c)}{DR} = 0,0384211 < 0.3$$

7.2.4. Volba počtu TEO

Při volbě počtu TEO vycházím z těchto hledisek:

1. hledisko technologie - umístění TEO na roztečných kružnicích s ohledem na výrobu nátrubku
2. hledisko dodržení celkového tep. výkonu
3. hledisko pevnostních podmínek

V úvahu беру průběh napětí σ_{red} ve dně (obr. 6.4)

Ze získaných výsledků plyne, že nejvhodnější poloměry roztečných kružnic se nachází v intervalu:

$$900 \text{ mm} < R < 1360 \text{ mm}$$

Určení poloměrů roztečných kružnic (obr. 6.5) :

$$\text{průměr otvoru} \quad d = 45 \text{ [mm]}$$

$$\text{max. průměr vnějšího nátrubku} \quad dc = 100 \text{ [mm]}$$

$$\text{vzdál. mezi vnějšími nátrubky} \quad lc = 140 \text{ [mm]}$$

$$\text{počet TEO na jedné roztečné kružnici} \quad n = 25$$

Poloměr 1. roztečné kružnice:

$$R1 = \frac{n \cdot (dc + lc)}{2\pi} = 955 \text{ [mm]} \quad (94)$$

$$\text{Volím } R1 = 960 \text{ [mm]}$$

Poloměr 2. roztečné kružnice:

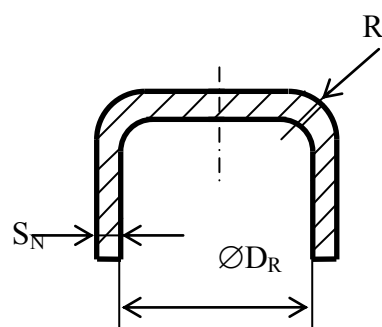
$$R2 = R1 \cdot \cos \varphi + \frac{\sqrt{(2 \cdot R1 \cdot \cos \varphi)^2 - (R1^2 - ld^2)}}{2} = 1160 \text{ [mm]} \quad (95)$$

$$ld = lc + dc = 240 \text{ [mm]} \quad (96)$$

$$\varphi = \frac{\frac{360}{2}}{n} = 7,2 \text{ [°]} \quad (97)$$

obr. 7.3.

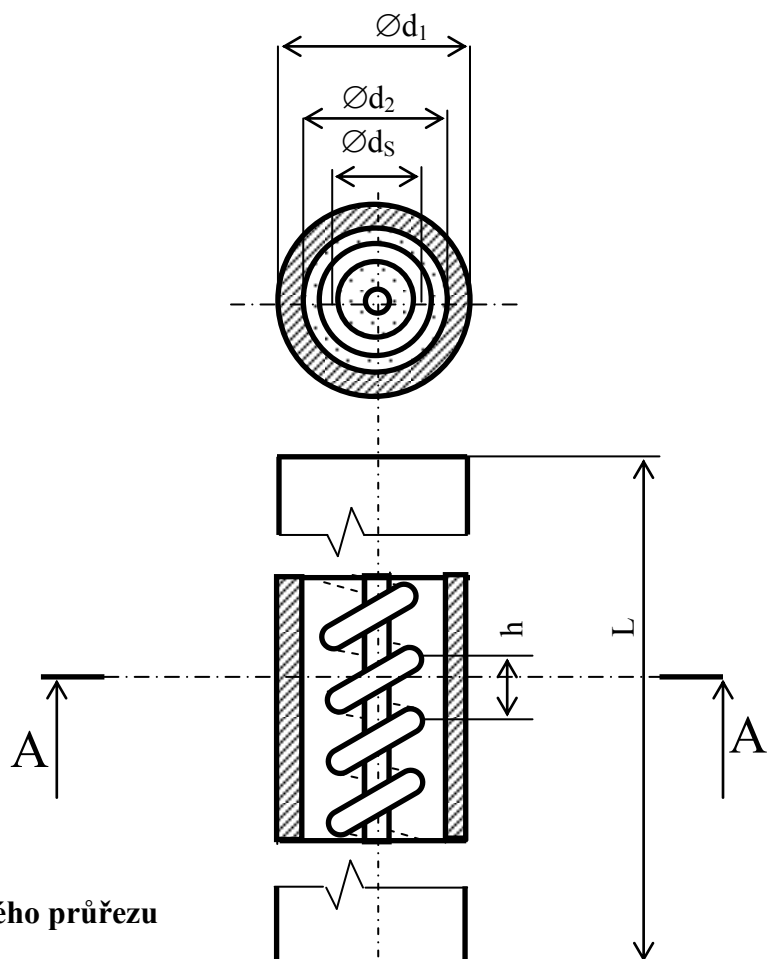
Horní dno TEO



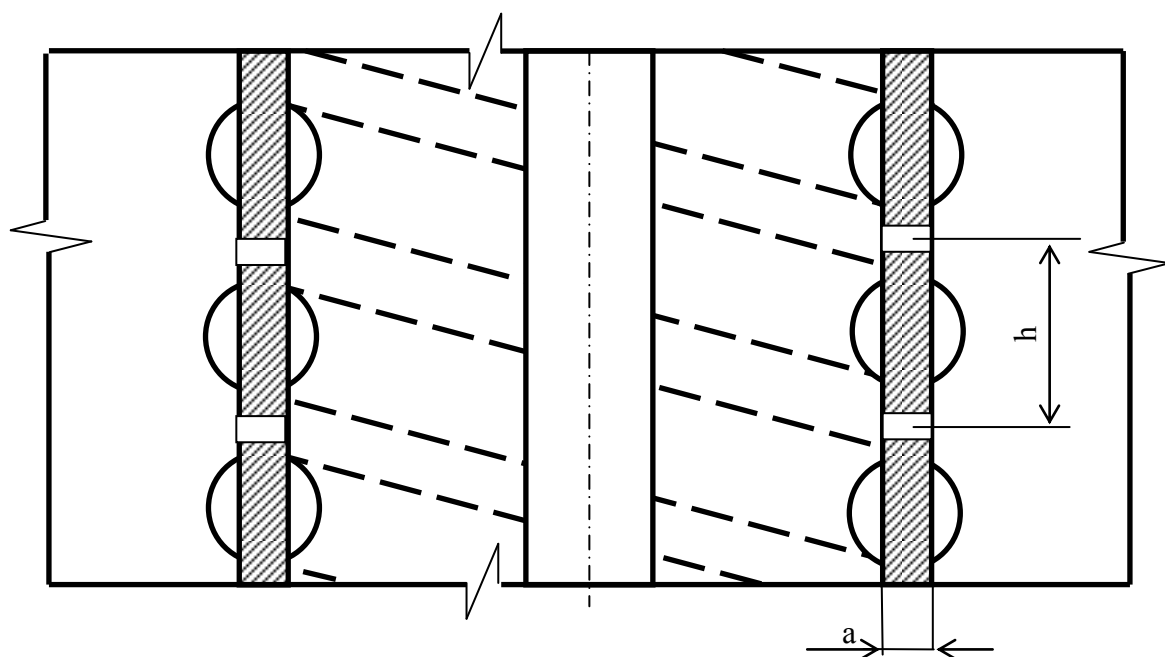
obr. 7.1.

Schéma TEO

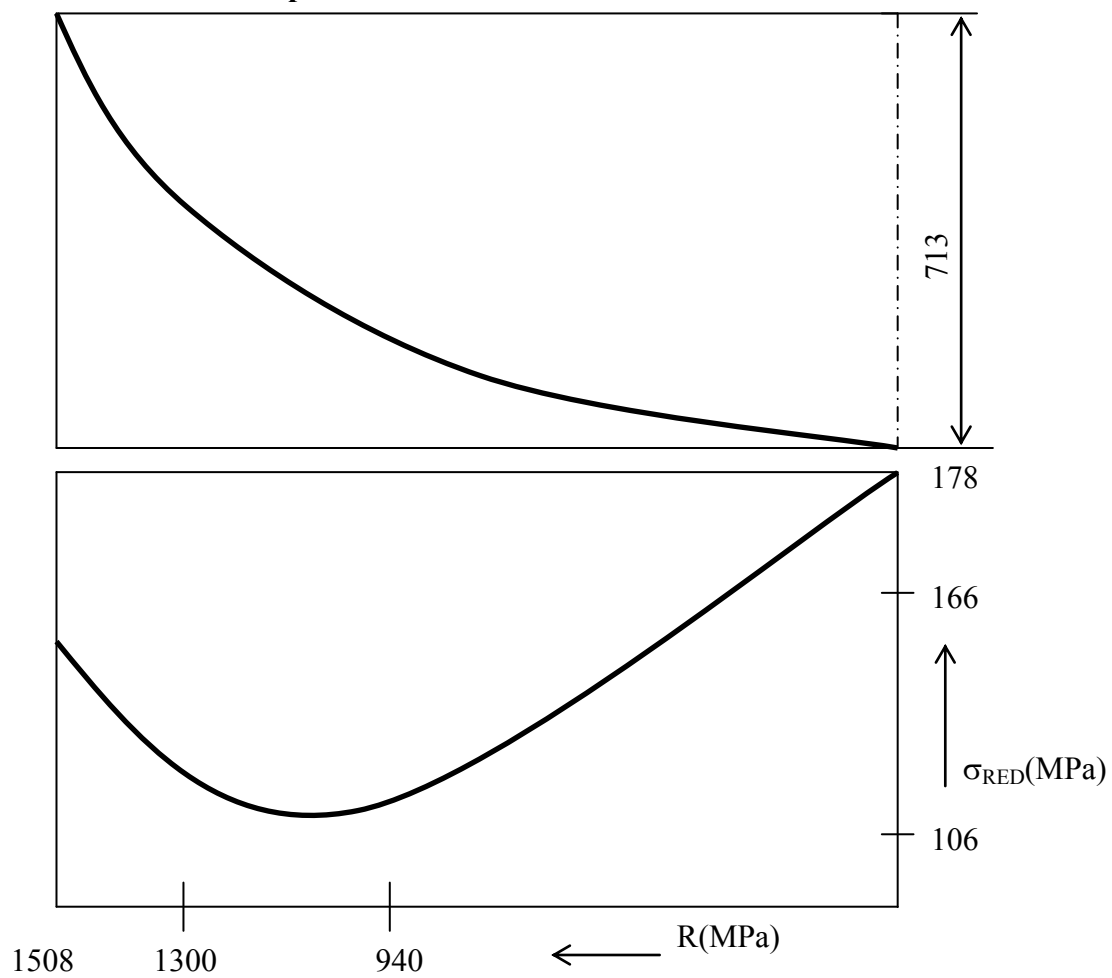
A-A



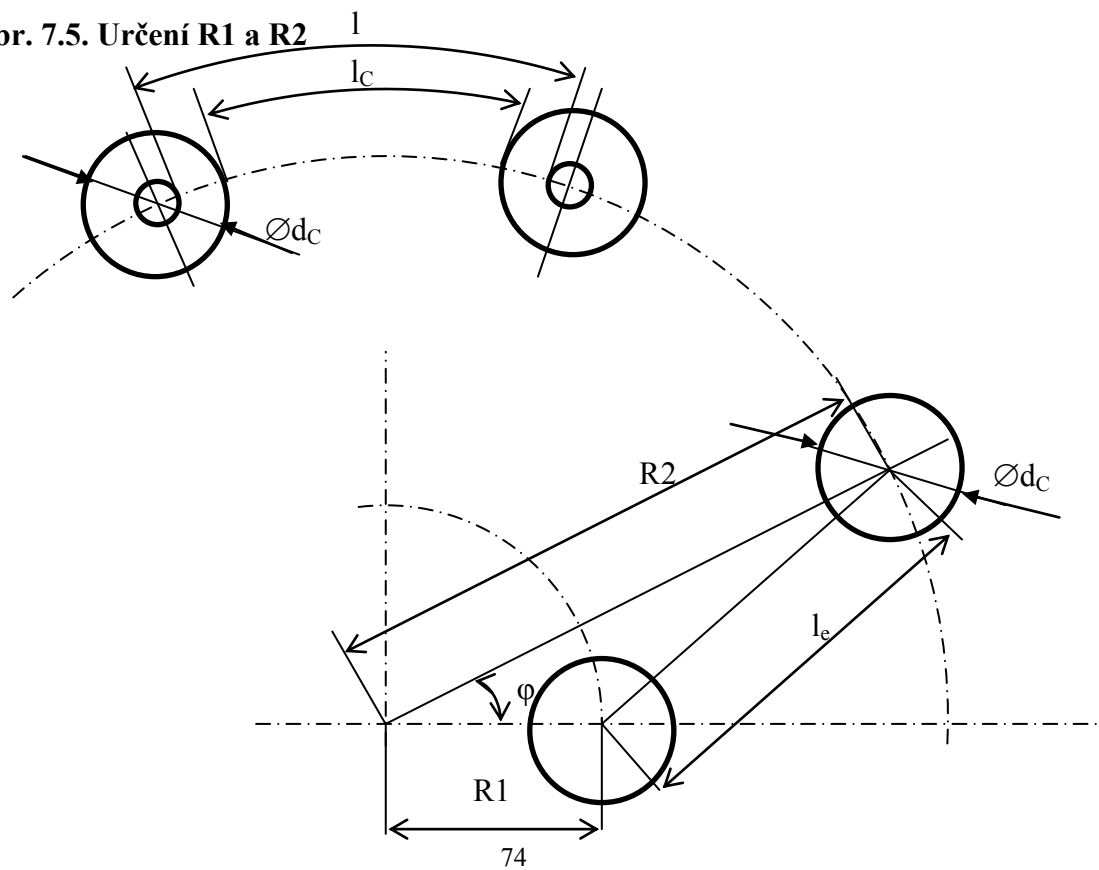
obr. 7.2. Náhrada kruhového průřezu



obr. 7.4. Průběh napětí ve dně



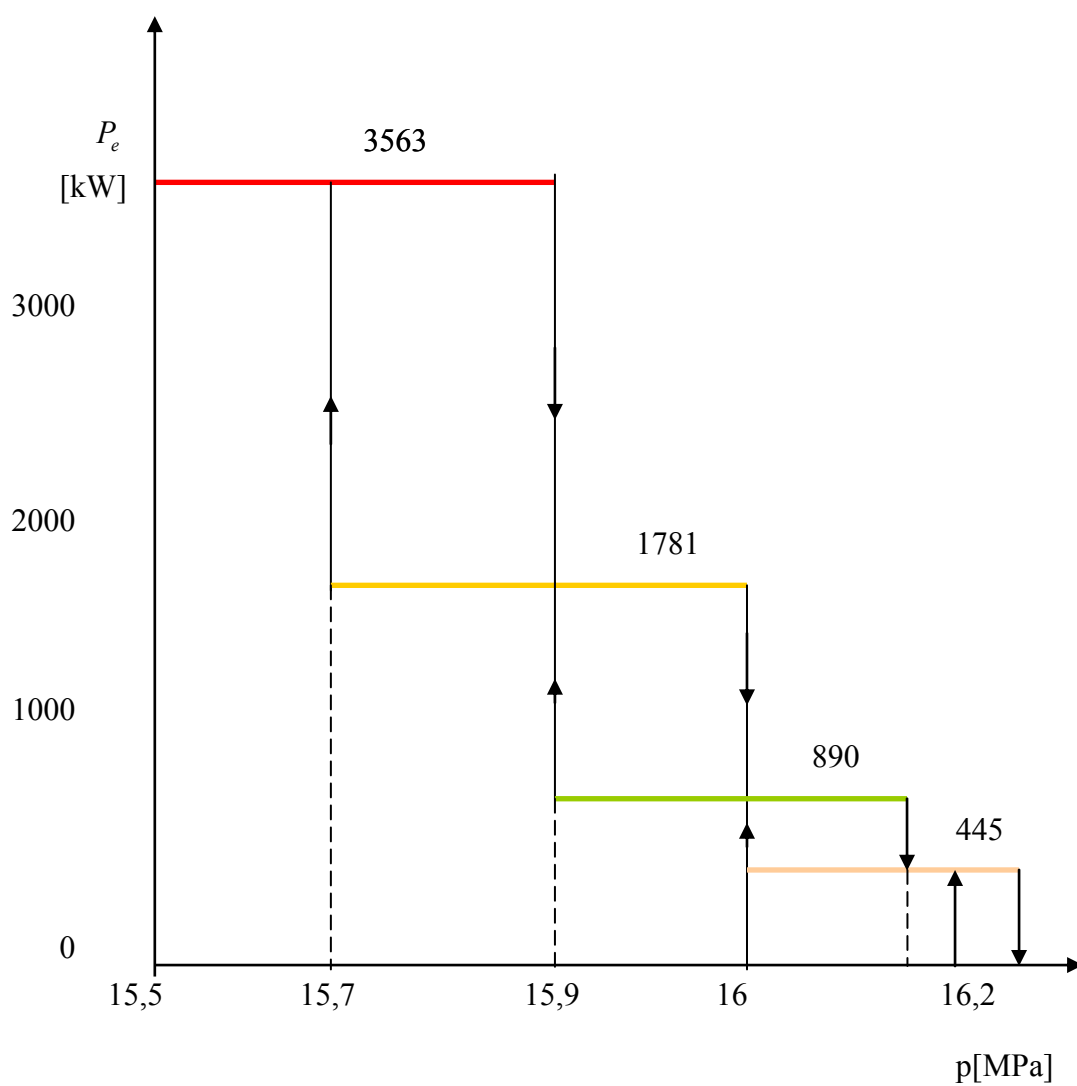
obr. 7.5. Určení R1 a R2



tab. 7.1. Parametry elektroohřivačů

Elektroohřivače		1.	2.	3.	4.
zapínací tlak	MPa	16,2	16,0	15,9	15,7
vypínací tlak	MPa	16,25	16,15	16,0	15,9
výkon	kW	222	445	890	1781
celkový výkon	kW	3563			

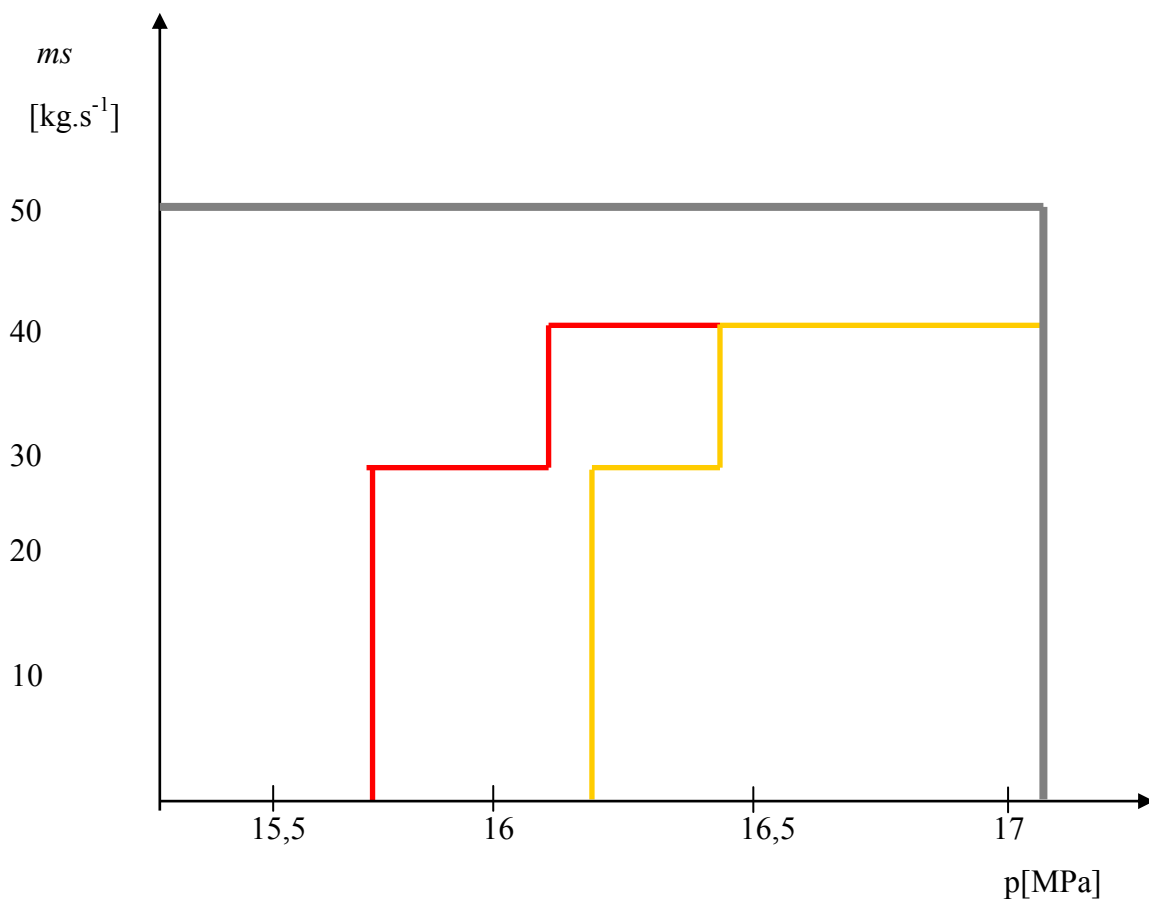
obr.7.6. Provozní charakteristiky elektroohřivačů



tab. 7.2. Parametry sprchového systému

Elektroohříváče		1.	2.
otevírací tlak	MPa	16,1	16,3
zavírací tlak	MPa	15,8	16
průtočné množství	kg.s ⁻¹	30	15
max. průtočné množství	kg.s ⁻¹	45	

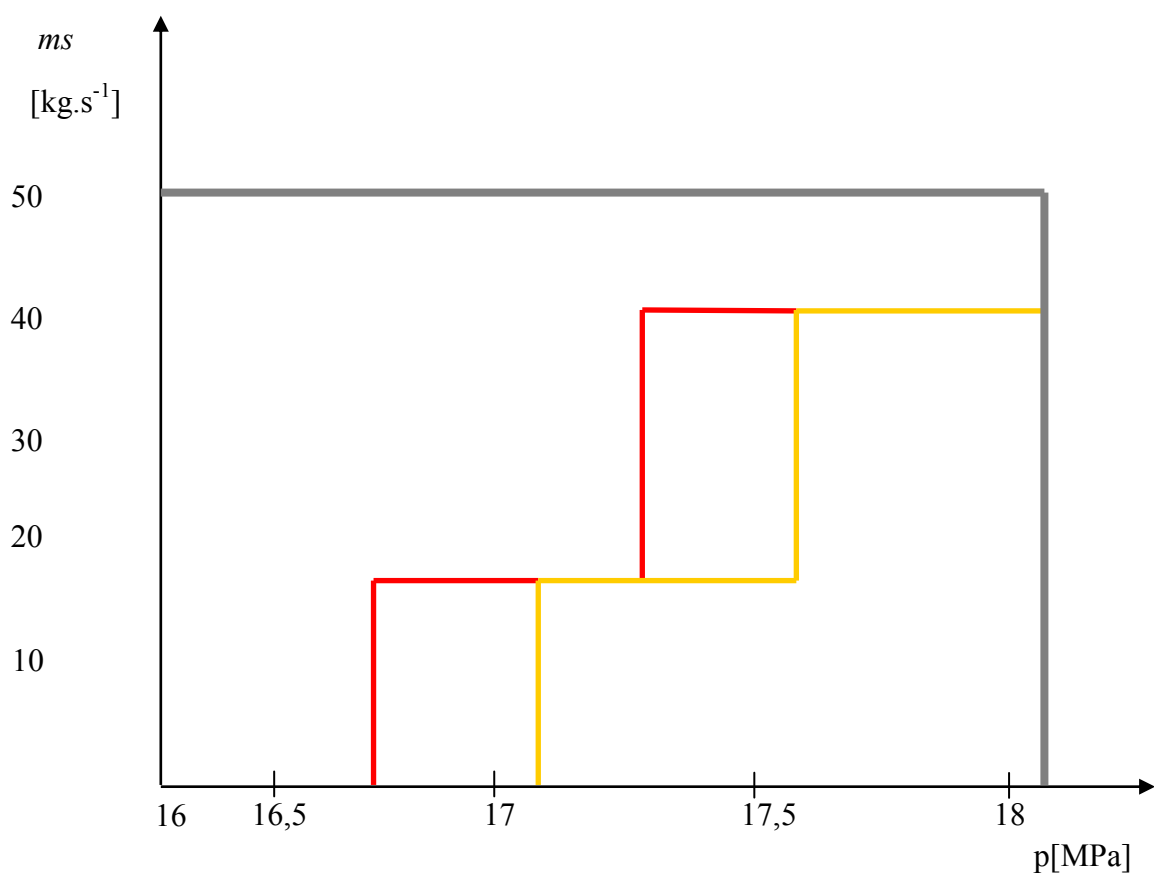
obr.7.7 . Provozní charakteristiky sprchového systému



tab. 7.3. Parametry pojistného systému

Elektroohřívače		1.	2.
otevírací tlak	MPa	17,2	17,6
zavírací tlak	MPa	16,9	17,3
průtočné množství	kg.s ⁻¹	50	150

obr.7.8. Provozní charakteristiky pojistného systému



8. Závěr

V kapitole 1, 2 této práce je uveden základní přehled generací a druhů reaktorů. Tlakovodní reaktor typu VVER 1500, pro který jsem měl za cíl navrhnout kompenzátor objemu, má přibližně o 50% větší výkon než reaktor v České jaderné elektrárně Temelín. Dále je zde popsán systém kompenzace objemu.

V kapitole 3 jsou uvedeny dva základní druhy kompenzátoru objemu s detailním popisem a schématem jejich zapojení.

V kapitole 4 je proveden technologický a konstrukční návrh výpočtu. Jednotlivé části byly optimalizovány. Výsledné hodnoty jsem v průběhu porovnával s již navrženým kompenzátozem a odlišnost je patrná zejména ve spodní části. Spodní plášť je zesílen na 200 mm zejména z důvodu návaznosti na eliptické dno.

V kapitole 5 je řešen matematický model, který byl odvozen v rámci státního úkolu "Parogenerátor a kompenzátor objemu." Cílem bylo stanovení havarijních a provozních situací. Je zde popsáno matematické modelování přechodových procesů v systému kompenzace chladiva.

V kapitole 6 a 7 je uveden návrh sprchového systému a systému elektroohříváčů. Při návrhu svislých trubkových elektroohříváčů umístěných ve spodním dně jsem vycházel ze současných (TEO) pro kompenzátor objemu VVER 1000. Výhody tohoto řešení jsou: a) využití ověřeného typu elektrických ohříváčů b) velký průměr základního tělesa, je nevhodný pro umístění ve spodním dně s tím souvisí i jednotlivé nátrubky. Vypočtená střední pracovní teplota souhlasí s únosnou tolerancí s předem zvolenou hodnotou. Při volbě počtu (TEO) jsem vycházel z hledisek umístění na roztečných kružnicích, dodržení celkového tepelného výkonu a hlediska pevnostních podmínek.

Závěrem se chci zmínit o použitých prostředcích výpočetní techniky, na které jsem diplomovou práci zpracoval. Převážná část je tvořena v softwaru Office Microsoft 2007 a programu MATLAB R2007a. Výkresová dokumentace je zpracována v programu AutoCAD 2007.

Dosažené výsledky považuji za konkrétní a mé poděkování patří panu prof. Ing. Pavlu Kolatovi, DrSc., který mi pomáhal s orientací v této problematice.

8.1. Seznam obrázků a tabulek:

Obrázky:

Obrázek č. 2.1 Schéma jaderné elektrárny VVER-1500.....	15
[http://nuclear-engineering-international-online.com]	
Obrázek č. 7.1 Schéma TEO.....	73
Obrázek č. 7.2 Náhrada kruhového průřezu.....	73
Obrázek č. 7.3 Hodní dno TEO.....	73
Obrázek č. 7.4 Průběh napětí ve dně.....	74
Obrázek č. 6.5 Určení R1 a R2.....	74
Obrázek č. 7.6 Provozní charakteristiky elektroohříváčů.....	75
Obrázek č. 7.7 Provozní charakteristiky sprchového systému.....	76
Obrázek č. 7.8 Provozní charakteristiky elektroohříváčů.....	77

Tabulky:

Tabulka č. 1.1. Vývoj reaktoru.....	11
Tabulka č. 1.2. Rozdělení reaktorů podle chlazení.....	12
Tabulka č. 1.3. Typy reaktorů.....	13
Tabulka č. 4.1. Materiál austenitický návar.....	25
Tabulka č. 4.2. Materiál 10GN2MFA.....	25
Tabulka č. 4.3. Přísadový prvek.....	25
Tabulka č. 4.4. Materiál 22K.....	25
Tabulka č. 4.5. Přísadový prvek.....	26
Tabulka č. 4.6. Austenitická ocel.....	26
Tabulka č. 4.7. Uhlíková ocel.....	26
Tabulka č. 4.8. Metoda půlení intervalu.....	27
Tabulka č. 4.9. Obecný vztah pro výpočet.....	29
Tabulka č. 4.10. Obecný vztah pro výpočet.....	31
Tabulka č. 5.1. Parametry KO VVER 1500.....	62
Tabulka č. 6.1 Vstupní údaje pro výpočet.....	64
Tabulka č. 7.1. Parametry pro zvýšení výkonu.....	67

Tabulka č. 7.2. Vstupní údaje pro navrhovanou délku topného odporu.....	68
Tabulka č. 7.3 Vstupní údaje pro výpočet střední pracovní teploty.....	69
Tabulka č. 7.4. Pevnostní charakteristiky.....	71

8.2. Použité zdroje literatury

literatura:

- [1] RÉDR. M., PŘÍHODA. M. *Základy tepelné techniky. Praha. SNTL. 1991*
(ISBN 80-03-00366-0)
- [2] SADIK KAKAC. *Boilers, evaporators, condensers. John.Wiley.USA. NewYork. (CIP 90-22486)*
- [3] HEJZLAR. R. *Stroje a zařízení jaderných elektráren, Díl.1.Vydavatelství ČVUT v Praze. 2005 (ISBN 80-01-03190)*
- [4] BLAHOŽ,V.,KADLEC, Z. *Základy sdílení tepla. Ostrava:SPBI,2000*
(ISBN 80-902001-1-7.)
- [5] KADLEC,Z.: *Průvodce sdílením tepla pro požární specialisty. Ostrava:SPBI, 2009. (ISBN 978-80-7385-061-6)*
- [6] HEJZLAR. R. *Stroje a zařízení jaderných elektráren, Díl.2.Vydavatelství ČVUT v Praze. 2005 (ISBN 80-01-03191)*
- [7] BEČVÁŘ. J. *Jaderné elektrárny*
- [8] VÍTKOVICE. *In the field of nuclear power generating equipment*
- [9] BOHUMÍR STRNADEL. *Nauka o materiálu. Ostrava. 2004 (ISBN 80-248-0689-4)*
- [10] FOJTA. *Specifikace konstrukčních materiálů VVER 1000. Vítkovice 1986.*
- [11] RADA. *Elektrotepelná technika. SNTL. 1958*
- [12] M.VLK. *Základy posuzování odolnosti proti křehkému a únavovému porušení. Ostrava. 1985*
- [13] O.UMBRÁ. *Matematický model systému kompenzace objemu JE VVER. Praha. 1983*
- [14] ŠTĚTINA. *Technické podmínky na dodávku KO VVER 1000. Ostrava. 1984*
- [15] *Normalizace v jaderné energetice. Praha. 1983*

Internet:

- [1] <http://www.339.vsb.cz/>
- [2] <http://www.cez.cz/>
- [3] <http://energetik.cz/>
- [4] <http://www.tzb-info/>
- [5] <http://cs.wikipedia.org/>
- [6] [http://nuclear engineering international online.com/](http://nuclear-engineering-international-online.com/)
- [7] <http://www.jaderna-energie.cz/>
- [8] <http://www.rusnuclear.cz/>